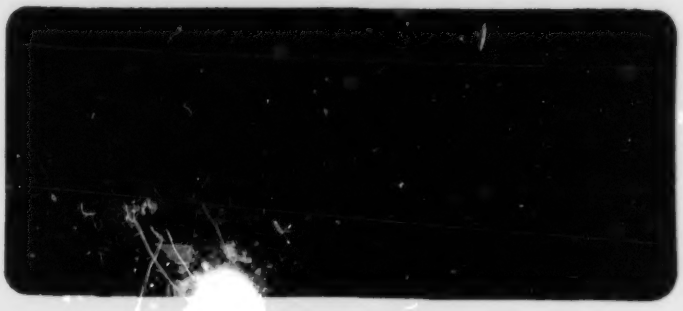


CENTRE SAINT-LAURENT

Environnement Canada
Conservation et Protection
Région du Québec

Environment Canada
Conservation and Protection
Quebec Region

93-01995/

ÉTUDE SUR LA RÉPONSE DU BASSIN VERSANT DU LAC LAFLAMME AUX PRÉCIPITATIONS ACIDES: juin 1981 - mai 1990

Suzanne Couture
M. Sc.

Rédigé pour la Direction des eaux intérieures - Centre Saint-Laurent
Conservation et Protection - Région du Québec
Environnement Canada

Mars 1992

AVIS DE RÉVISION

Le présent rapport a été examiné par le Centre Saint-Laurent, Conservation et Protection, Environnement Canada, qui en a autorisé la publication. Cette autorisation ne signifie pas nécessairement que le contenu du rapport reflète les opinions et les politiques du Ministère. Les mentions de marques de commerce ou de produits commerciaux ne signifient aucunement que leur utilisation est recommandée.

COMMENTAIRES DES LECTEURS

Veuillez adresser vos commentaires sur le contenu du présent rapport à la Direction des eaux intérieures, Centre Saint-Laurent, Conservation et Protection, Environnement Canada, 1141 Route de l'Église, Ste-Foy (Québec) G1V 4H5.

RÉSUMÉ

Au bassin versant du lac Laflamme, l'analyse de l'évolution temporelle des charges atmosphériques annuelles de sulfates montre que celles-ci ont augmenté entre 1981 et 1984 (de 19,4 kg/ha à 23,2 kg/ha) puis diminué entre 1985 et 1990 (de 23,1 kg/ha à 16,7 kg/ha). Pour la série temporelle s'échelonnant de juin 1981 à mai 1990, une tendance à la baisse des charges atmosphériques de sulfates est détectée. Cette tendance est le premier indice statistiquement significatif de l'amélioration de la qualité des précipitations au niveau des polluants acides, enregistré depuis le début des études sur ce site. Par contre, cette amélioration de la qualité des précipitations semble trop récente pour distinguer une réponse des eaux de surface du bassin versant. En effet, l'alcalinité de l'eau du lac et de l'exutoire continue de montrer une tendance à la baisse. Le rapport bicarbonates/sulfates est sous l'unité pour plus de la moitié de l'année à l'exutoire. Les concentrations de sulfates aux deux stations sont à la hausse montrant que les dépositions atmosphériques restent trop élevées pour la capacité du système.

En tenant compte de cette tendance à la baisse des dépositions atmosphériques de sulfates, il sera maintenant important d'analyser la réponse du bassin versant. Il sera aussi intéressant d'établir des seuils ou des périodes de dépositions où une amélioration de la qualité des eaux de surface pourra être identifiée, c'est-à-dire, dans le cas du lac Laflamme, une baisse dans les concentrations de sulfates et une hausse dans la capacité des eaux à neutraliser l'acide.

ABSTRACT

For the Laflamme Lake Watershed, the study of the temporal variations in annual sulphate atmospheric loading shows that it has increased between 1981 and 1984 (from 19,4 kg/ha to 23,2 kg/ha) then decreased between 1985 and 1990 (from 23,1 kg/ha to 16,7 kg/ha). For the time series from June 1981 to May 1990, a decreasing trend in sulphate atmospheric loading was detected. This trend is the first statistically significant indicator of improvement in precipitation quality with respect to acidifying pollutants registered since the beginning of studies at this site. However the improvement in precipitation quality seems too recent to be able to distinguish a response in surface waters in the watershed. In effect, lake and outlet alkalinity continues to show a decreasing trend. The bicarbonate to sulphate ratio is below unity for more than half of the year at the outlet. The sulphate concentrations at both stations are increasing which shows that atmospheric deposition remains too high for the capacity of the system.

Taking into account this decreasing trend in sulphate atmospheric deposition, it will now be important to analyse the response of the watershed. It will also be interesting to establish levels or periods of atmospheric loading when the improvement in surface water quality will be identified that is to say in the case of Laflamme Lake a decrease in sulphate concentrations and an increase in acid neutralizing capacity.

TABLE DES MATIERES

AVIS DE RÉVISION/COMMENTAIRES DES LECTEURS		iii
RÉSUMÉ		iv
ABSTRACT		v
LISTE DES TABLEAUX		viii
LISTE DES FIGURES		ix
REMERCIEMENTS		xi
1	**INTRODUCTION**	1
2	**MÉTHODOLOGIE**	3
2.1	Protocole expérimental pour les eaux souterraines	5
2.2	Estimation des données manquantes pour la période de septembre 1990 à janvier 1991	7
2.2.1	Les cations majeurs	8
2.2.2	L'alcalinité	9
2.2.3	Les sulfates	10
2.2.4	La conductivité, le pH, les nitrates, la couleur et les chlorures	11
2.3	Changement de méthode analytique	11
2.3.1	Les métaux lourds	11
2.3.2	Les cations majeurs	13
3	**LES PRÉCIPITATIONS**	15
3.1	Le volume des précipitations	15
3.2	La qualité des précipitations	15
4	**LE LAC, L'EXUTOIRE ET LES EAUX SOUTERRAINES**	18
5	**CARACTÉRISTIQUES DES SÉRIES TEMPORELLES**	23
5.1	Les séries du lac et de l'exutoire	23
5.1.1	L'alcalinité Gran	26
5.1.2	Le calcium	28
5.1.3	La couleur	28
5.1.4	Le potassium et le sodium	29

5.1.5	Les nitrates	29
5.1.6	Les sulfates	30
5.1.7	Le manganèse	32
5.2	Les séries des précipitations	32
5.2.1	Les nitrates	33
5.2.2	L'ion ammonium	35
5.2.3	Les sulfates	35
6	**LA RÉPONSE DU BASSIN VERSANT AU STRESS ACIDE**	36
6.1	Les indicateurs d'exposition	36
6.1.1	Les charges atmosphériques de sulfates	36
6.1.2	Les concentrations de sulfates dans les eaux de surface	36
6.1.3	Les charges atmosphériques de nitrates	38
6.2	Les indicateurs d'effet	41
6.2.1	Le rapport bicarbonates/sulfates	41
6.2.2	La baisse d'alcalinité des eaux de surface	44
6.3	Les bilans chimiques comme indicateurs	45
6.3.1	Les sulfates	45
6.3.2	Les cations majeurs	52
6.3.3	L'ion hydrogène	52
6.3.4	Les nitrates	55
6.3.5	Les chlorures	55
6.4	Les eaux souterraines, indicateur précurseur de l'acidification	55
7	**CONCLUSION**	58
RÉFÉRENCES		60
ANNEXES		
1	Données de laboratoire du lac Laflamme 1990 et 1991	63
2	Données de laboratoire de l'exutoire du lac Laflamme 1990 et 1991	67
3	Évolution des moyennes mensuelles de l'alcalinité (1981-1990)	70
4	Apports atmosphériques mensuels pour le bassin versant du lac Laflamme en 1989 et 1990 (kg/ha)	74
5	Exportations mensuelles à l'exutoire du lac Laflamme en 1990 (kg/ha)	76

LISTE DES TABLEAUX

1	Méthodes analytiques pour les précipitations et les eaux de surface en 1991	4
2	Valeurs manquantes dans les séries du lac et de l'exutoire pour 1991	5
3	Relations statistiques entre les résultats analytiques du laboratoire de Burlington et ceux du laboratoire de Longueuil	9
4	Précipitations et écoulements annuels au lac Laflamme par année hydrologique et par année civile	16
5	Moyennes annuelles pondérées des paramètres analysés pour les précipitations	17
6	Moyennes annuelles des paramètres chimiques au centre du lac (1981-1991)	20
7	Moyennes annuelles des paramètres chimiques à l'exutoire du lac (1981-1991)	21
8	Tendances dans les séries temporelles des concentrations pour le lac, l'exutoire et les précipitations (juin 1981-mai 1990)	25
9	Tendances dans les séries temporelles des charges pour les précipitations et l'exutoire (juin 1981-mai 1990)	26
10	Charges annuelles pour les paramètres de qualité des précipitations analysés au lac Laflamme (kg/ha)	37
11	Les rapports annuels de bicarbonates/sulfates au lac et à l'exutoire par année hydrologique	42
12	Charges annuelles exportées à l'exutoire du lac Laflamme (kg/ha)	46
13	Les écarts (kg/ha) entre les charges atmosphériques et les charges sortant à l'exutoire pour 1981 à 1990	47

LISTE DES FIGURES

1	Localisation des piézomètres échantillonnés au lac Laflamme	6
2	Évolution temporelle des concentrations de fer au lac et de l'aluminium à l'exutoire suite au transfert de laboratoire (1983) et au changement analytique (1990)	12
3	Comparaison des moyennes mensuelles des cations majeurs après un changement de méthode en 1991	14
4	Hydrogramme (m^3/sec) de 1990 pour l'exutoire du lac Laflamme	18
5	Séries temporelles saisonnières de l'alcalinité Gran et des concentrations de calcium au lac (juin 1981 - mai 1990)	27
6	Évolution temporelle des concentrations de sulfates au lac et des charges atmosphériques de sulfates (juin 1981-mai 1990)	31
7	Tendances à la hausse dans les concentrations mensuelles des composés azotés des précipitations (juin 1981-mai 1990)	34
8	Comparaison des charges atmosphériques annuelles de sulfates et des concentrations moyennes de sulfates au lac pour les mois de juin	39
9	Évolution des moyennes mensuelles des concentrations de sulfates les mois de janvier et février	40
10	Évolution temporelle du rapport bicarbonates/sulfates pour 1989 au lac et à l'exutoire	43
11	Moyennes mensuelles des concentrations de sulfates et de l'alcalinité du lac et le rapport bicarbonates/sulfates (1981-1990)	44
12	Bilan ionique annuel des sulfates et de l'ion hydrogène	48
13	Bilan ionique saisonnier des sulfates	51

14	Bilan ionique annuel du calcium et du magnésium	53
15	Bilan ionique annuel du sodium et du potassium	54
16	Bilan ionique annuel des nitrates et des chlorures	56

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier le personnel de la Direction de eaux intérieures de Sainte-Foy, ainsi que le personnel des laboratoires de Longueuil et de Burlington pour leur contribution dans l'acquisition des données. Des remerciements spéciaux vont à madame Madeleine Papineau et monsieur Denis Labonté pour leurs conseils judicieux et leur aide précieuse tout au long de ce projet.

1 INTRODUCTION

Il y a maintenant plus de dix ans que le projet du bilan ionique du lac Laflamme est en opération. Ce projet ainsi que de nombreuses études complémentaires dans le bassin ont contribué à mettre en lumière la problématique des pluies acides dans l'est du Canada ainsi qu'à établir des seuils critiques de dépositions atmosphériques des polluants acides au-delà desquels des dommages aux écosystèmes aquatiques peuvent survenir. Des inventaires sur la faune, la flore, l'hydrogéologie, les dépôts meubles et la pédologie ont été effectués dans le but de caractériser le bassin versant. Une description du bassin versant est disponible dans Couture (1991). Des études ont permis d'identifier les paramètres physico-chimiques mis en cause dans l'acidification des écosystèmes aquatiques ainsi que la mise en évidence des cycles biogéochimiques de ces paramètres. D'autres études portent sur la détection de tendances dans les séries temporelles des paramètres de la qualité des eaux.

Depuis 1985, année où le programme de lutte contre les pluies acides a débuté au Canada, le monitoring de la qualité des eaux de surface est devenu encore plus nécessaire. En effet, d'ici 1994, le Canada en s'engage à réduire de 50 p.100 (1980 étant l'année de référence), les émissions atmosphériques des polluants acides (SO_2), pour ainsi réduire les effets néfastes de l'acidification sur les forêts, les sols et les milieux aquatiques. Ce sont les provinces de l'Ontario et du Québec qui contribueront majoritairement à cette réduction de 50 p.100. La province de Québec s'engageait en 1984 à réduire ses émissions de 45 p.100 d'ici 1990. Puis en 1989, l'engagement changeait pour une réduction de 55 p.100 d'ici 1995. En 1990, les émissions québécoises totalisaient 400 kilotonnes soit une réduction de 63 p.100 par rapport aux émissions de 1980 (1098 kilotonnes) (RMCC, 1990). L'Ontario vise une réduction de 60 p.100 de ses émissions, soit une limite de 885 kilotonnes/an à respecter à partir 1994. En 1990, les quatre sources majeures de SO_2 en Ontario

totalisaient 970 kilotonnes de SO_2 par rapport à près de 2000 kilotonnes en 1980. Compte tenu de ces réductions d'émissions, le suivi sur les dépositions atmosphériques des polluants acides et sur la récupération de la qualité des plans d'eau, devient importante. Le bassin versant du lac Laflamme constitue le seul endroit au Québec où il est possible de suivre l'évolution dans la qualité des précipitations pour ainsi documenter les répercussions des réductions d'émissions sur la qualité des eaux de surface et souterraines.

Dans ce rapport, le chapitre de la méthodologie explique les démarches et les méthodes statistiques utilisées pour estimer les valeurs manquantes des séries temporelles du lac et de l'exutoire, ce qui permettra par la suite de dégager des tendances temporelles dans la qualité des eaux de surface. Les séries temporelles doivent être complètes pour détecter des tendances. Les caractéristiques de la qualité et la quantité des précipitations sont présentées au chapitre 3, en particulier pour les années 1989 et 1990. Le chapitre 4 présente l'hydrologie et la qualité de l'eau du lac, de l'exutoire et des eaux souterraines en s'attardant un peu plus sur les années 1990 et 1991. Les caractéristiques statistiques des séries temporelles des paramètres de la qualité des eaux du lac, de l'exutoire et des précipitations sont présentées au chapitre 5 en mettant l'accent sur les séries temporelles où l'on détecte des tendances statistiquement significatives. Les caractéristiques des séries temporelles des charges atmosphériques et des charges à l'exutoire sont aussi présentées dans ce chapitre. Finalement le dernier chapitre présente la réponse du bassin versant aux précipitations acides à l'aide d'indicateurs d'exposition et d'effet comme les tendances temporelles, les bilans ioniques annuels, les rapports bicarbonates/sulfates et la qualité des eaux souterraines.

2 MÉTHODOLOGIE

Le bassin versant du lac Laflamme est situé en forêt boréale à 80 km au nord de la ville de Québec. La superficie du bassin versant est de 0,68 km^2 et celle du lac est de 0,06 km^2, sa longitude est de 71°07' et sa latitude de 47°19'. Une description plus détaillée est disponible dans Couture (1991). Chaque semaine, un échantillon intégré au centre du lac ainsi qu'un autre à l'exutoire sont prélevés dans le but de mesurer les concentrations de plus de 30 paramètres dont 16 sont des métaux lourds. Les paramètres analysés sont présentés au tableau 1. Bimestriellement on rajoute les mesures des concentrations de l'ion ammonium, des silicates, du carbone inorganique dissous, du carbone organique dissous et des sulfates par chromatographie ionique. Les dates d'échantillonnage sont présentées en annexe 1. Des changements analytiques importants sont survenus en 1990 et 1991 et seront discutés dans les sections suivantes. Le tableau 2 résume les dates pour 1991 où les résultats analytiques ont été estimés suite à des résultats aberrants ou à des échantillons qui n'ont pu être analysés. Les protocoles de validation et de traitement des données sont présentés dans Couture (1991). Les banques de données validées de 1990 et 1991 pour le lac et l'exutoire se retrouvent en annexe 1 et 2.

L'échantillonnage journalier des précipitations est sous la responsabilité du Service de l'environnement atmosphérique. En 1980, la station météorologique de la forêt Montmorency a été installée et faisait partie du réseau APN (Air and Precipitation Network). En juillet 1983, cette station fut intégrée au réseau RCEPA (réseau canadien d'échantillonnage des précipitations et de l'air). Pour les données sur la qualité et le volume des précipitations, il y a lieu de consulter les travaux de Barrie *et al.* (1982, 1984), Wiebe *et al.* (1985) et Vet *et al.* (1986, 1988a, 1988b, 1989). Les paramètres analysés sont présentés au tableau 1.

Tableau 1 Méthodes analytiques pour les précipitations et les eaux de surface en 1991

Paramètre	Précipitations	Lac-exutoire	N°Naquadat lac-exutoire
pH	Électrométrie	Électrométrie	10301
Ca (mg/l)	Absorption atomique	I.C.P.(a)	20111
Mg (mg/l)	Absorption atomique	I.C.P.	12111
Na (mg/l)	Photométrie par flamme	I.C.P.	11111
K (mg/l)	Photométrie par flamme	Absorption atomique (flamme)	19105
NH_4 (mg/l)	Colorimétrie	Autoanalyseur colorimétrique	07555
SO_4 (mg/l)	Chromatographie ionique	Autoanalyseur colorimétrique	16306
Cl (mg/l)	Chromatographie ionique	Autoanalyseur colorimétrique	17206
NO_2-NO_3 (mgN/l)(b)	Chromatographie ionique	Autoanalyseur colorimétrique	07112
Ptotal (mgP/l)		Autoanalyseur colorimétrique	15411
Conductivité (μS/cm)		Conductivimètre électrode spécifique	02041
Couleur vraie (unité de Hazen)		Colorimétrie(c)	02022
Alcalinité totale (mg $CaCO_3$/l)		Titrage potentiométrique	10101
Alcalinité Gran (mg $CaCO_3$/l)		Titrage de Gran(d)	10110
Dureté (mg $CaCO_3$/l)		Titrage-EDTA	10603
SiO_2 (mg SiO_2/l)		Autoanalyseur colorimétrique	14105
Carbone organique dissous (mgC/l)		Infrarouge-acidification(e)	06104
Carbone inorganique dissous (mgC/l)		Infrarouge	06180
Métaux lourds (Al,Ba,Be,Cd,Co,Cr,Cu,Fe,Li,Mn,Mo,Ni,Pb,Sr,V,Zn)		I.C.P.(a)	(f)

(a) = I.C.P. spectrophotométrie d'émission atomique au plasma
(b) = La limite de détection a changé de 0,01 à 0,02 le 18 juin 1991
(c) (d) (e) = Le numéro de la méthode dans NAQUADAT correspondant le plus à celle utilisée au laboratoire de Longueuil
(f) Les numéros NAQUADAT des métaux lourds sont disponibles dans Couture (1991)

Tableau 2 Valeurs manquantes dans les séries du lac et de l'exutoire pour 1991

Date	Paramètre	Lac	Exutoire	Échantillon pas analysé (estimation)	Valeur non validée (estimation)
Du					
91-01-02	pH, Ca, Mg	X	X	(a)	
	Na, K, NH_4	X	X		
au	Alc, SO_4, Cl	X	X		
	NO_3, SiO_2, COD	X	X		
	CID, Couleur	X	X		
91-01-22	Cd, Dureté	X	X		
91-05-07	Alcalinité	X			11,56 (4,61)
91-05-07	Cl	X			1,3 (0,6)
91-05-07	Conductivité	X			43 (23)
91-07-02	pH, Ca, Mg	X		X (6,7;1,9;0,43)	
91-07-02	Na, K, Alc.	X		X (0,9;0,15;3,72)	
91-07-02	Cond. Coul.	X		X (19;21)	
91-09-10	pH	X			8,6 (6,7)
91-10-29	pH, Ca, Mg	X		X (6,7;2,3;0,48)	
91-10-29	Na, K, Alc.	X		X (0,9;0,13;4,1)	
91-10-29	SO_4, Cl, NO_3	X		X (3,7;0,4;0,05)	
91-10-29	P, Cond., Coul.	X		X (0,008, 21, 28)	
91-10-29	pH, Ca, Mg		X	X (6,7;2,2;0,48)	
91-10-29	Na, K, Alc.		X	X (0,9;0,12;3,82)	
91-10-29	SO_4, Cl, NO_3		X	X (3,7;0,4;0,06)	
91-10-29	P, Cond., Coul.		X	X (0,010;21;28)	
91-11-12	P		X	X (0,008)	

(a) Les valeurs estimées pour cette période sont présentées en annexe 1 et 2.

2.1 Protocole expérimental pour les eaux souterraines

Un échantillonnage des eaux souterraines s'effectue depuis l'été 1988 pour quatre piézomètres de différentes profondeurs, situés sur le bassin versant du lac Laflamme (figure 1). Les piézomètres de 13 m, 2,9 m, et 2,8 m de profondeur ont été installés en 1981 lors d'une campagne de caractérisation des eaux souterraines sur le bassin versant (Azzaria *et al.* 1982). Le piézomètre de 0,8 m de profondeur, a été installé en 1987. Ils sont situés sur le versant nord du bassin dans une zone de recharge du lac (0,8 m, 2,8 m et 2,9 m) ou dans une zone de décharge (13 m). Le gel empêchant l'échantillonnage au cours de l'hiver, les échantillons ne sont prélevés qu'au printemps, l'été et l'automne. Ainsi un échantillonnage bimestriel des eaux souterraines commence en mai et se termine en novembre.

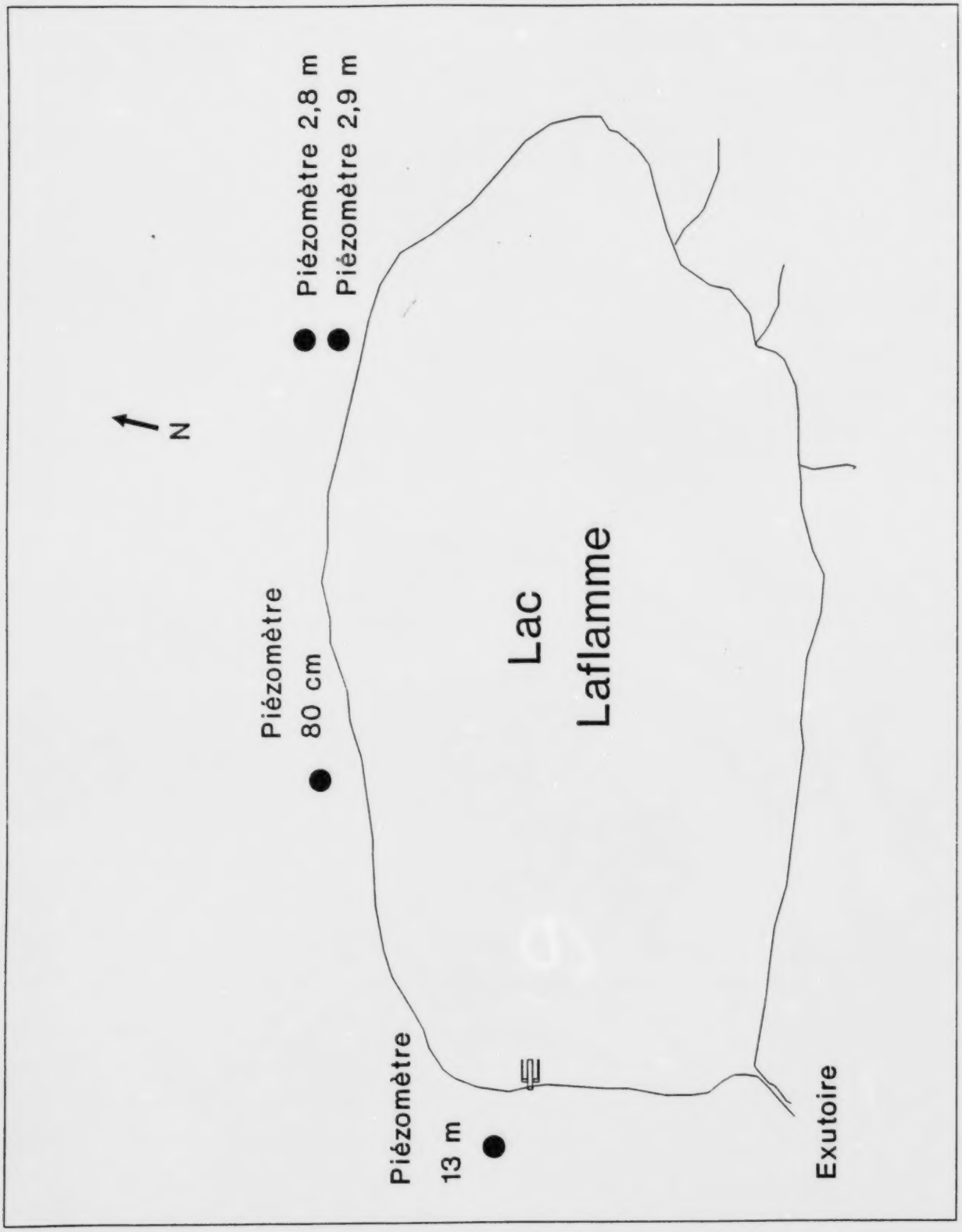


Figure 1 *Localisation des piézomètres échantillonnés au lac Laflamme*

Dans la mesure du possible deux litres d'eau sont pompés des piézomètres. Les échantillons sont filtrés (0,45 microns) et envoyés aux laboratoires pour l'analyse des mêmes paramètres qu'au lac et à l'exutoire exception faite du phosphore.

2.2 Estimation des données manquantes pour la période de septembre 1990 à janvier 1991

Pour que la détection de tendances statistiquement significatives soit attribuable à une réponse du bassin versant suite à des dépositions atmosphériques de polluants acides, il faut, entre autre, éviter des changements majeurs dans le protocole d'échantillonnage ou dans les méthodes d'analyse. Par contre, si ces changements sont inévitables, il faut toujours en tenir compte dans l'interprétation des données. Les techniques pour estimer les données manquantes doivent être choisies selon l'utilisation statistique des séries temporelles. Par exemple, en utilisant les moyennes saisonnières des années précédentes pour remplacer les valeurs manquantes, on peut influençer une tendance temporelle déjà détectée statistiquement. Les utilisations principales dans le cas des banques de données du lac Laflamme sont les détections de tendances ainsi que les statistiques descriptives comme la moyenne, l'écart type, la médiane et le coefficient de variation.

Entre le 4 septembre 1990 et le 22 janvier 1991, les analyses de chimie inorganique requises pour le projet du bilan ionique du lac Laflamme ont été transférées du laboratoire régional de Longueuil à un laboratoire privé. Il est à noter cependant, que depuis le 5 février 1991, ces analyses sont revenues au laboratoire régional de Longueuil. Les résultats analytiques du laboratoire privé n'ont pu être acceptés dû à de trop grands écarts dans les bilans ioniques ainsi que des grandes différences par rapport aux valeurs historiques. La variation des valeurs d'un même paramètre d'une semaine à l'autre étaient trop importante par rapport à la régularité hebdomadaire observée depuis 1981 (Couture et Bouchard, 1990). Ainsi, pour cette période, ce sont des programmes conjoints (universitaire et gouvernemental) et les résultats analytiques du laboratoire national de Burlington (méthode par

spectrophotométrie d'émission) qui ont permis l'obtention de résultats. Ces résultats restent partiels et certaines méthodes, comme des régressions et des interpolations, ont dû être utilisées pour estimer ou corriger certaines valeurs à l'exutoire et au lac.

Au cours de cette période trois semaines d'analyse au laboratoire régional de Longueuil sont disponibles (le 20 et le 26 novembre 1990 ainsi que le 3 décembre 1990). De plus, les concentrations de phosphore n'ont jamais cessé d'être mesurées au laboratoire de Longueuil. L'analyse des métaux lourds est demeurée au laboratoire de Burlington.

Pour la période de septembre 1990 à janvier 1991, l'estimation des valeurs manquantes s'est faite en fonction des caractéristiques de la banque de données qui contient plus de 500 valeurs pour le lac et autant pour l'exutoire. C'est donc dire que le but de l'estimation était d'incorporer à la banque de données des valeurs qui soient les plus respectueuses des gammes de valeurs de la banque de données qui s'échelonne de 1981 à août 1990 et qui proviennent essentiellement des résultats analytiques du laboratoire régional de Longueuil.

2.2.1 **Les cations majeurs.**- L'estimation des valeurs manquantes des cations majeurs s'est faite à partir des résultats analytiques du laboratoire national de Burlington. En effet, depuis le 22 mai 1990, les métaux lourds analysés au laboratoire national de Burlington sont passés de la méthode de l'absorption atomique à celle de la spectrophotométrie d'émission au plasma. Cette nouvelle méthode rend disponible les résultats analytiques des 4 cations majeurs (Ca, Mg, Na, K). De façon à respecter le plus possible les caractéristiques de la banque de données déjà existante, une droite de régression a été tirée entre les résultats analytiques des cations majeurs du laboratoire de Burlington (spectrophotométrie d'émission au plasma) et ceux du laboratoire de Longueuil (absorption atomique) pour des échantillons prélevés en même temps (une fois par semaine, au lac et à l'exutoire du 22 mai au 28 août 1990, du 20 novembre au 3 décembre 1990 et du 5 au 12 février 1991). Les relations statistiques

entre les deux résultats analytiques sont présentées au tableau 3. Les coefficients de corrélation sont bons mais, dans certains cas, la pente de la droite de régression est différente de un (test de Student) et l'ordonnée à l'origine différente de zéro (test de Student). Les résultats analytiques de Burlington ont donc été corrigés pour les paramètres où la pente de la droite de régression était significativement différente de un, donc dans le cas de Ca, Na et K.

Les valeurs de Mg n'ont pas été corrigées, simplement arrondies à un chiffre après le point.

Tableau 3 ***Relations statistiques entre les résultats analytiques du laboratoire de Burlington et ceux du laboratoire de Longueuil***

	Coefficient de corrélation	Pente	Ordonnée à l'origine
Ca	**0,98**	**1,32** significativement différente de un	**-0,13** pas significativement différente de zéro
Mg	**0,93**	**1,11** pas significativement différente de un	**-0,01** pas significativement différente de zéro
Na	**0,89**	**1,24** significativement différente de un	**-0,13** pas significativement différente de zéro
K	**0,89**	**0,74** significativement différente de un	**0,04** significativement différente de zéro

2.2.2 L'alcalinité.- Des mesures d'alcalinité Gran et d'alcalinité totale pour le lac et l'exutoire nous ont été fournies par le ministère de l'énergie et des ressources du Québec, le 11 et le 18 décembre 1990 ainsi que le 2, le 8, le 15 et le 22 janvier 1991. Ces valeurs ont été intégrées à la banque de données sans correction. Pour les

valeurs manquantes de septembre, octobre et novembre 1990, une droite de régression a été tirée entre l'alcalinité Gran et la somme des cations (Ca+Mg+Na+K) en se servant des données de 1990 (de janvier à août, n = 35) pour le lac d'une part et pour l'exutoire d'autre part. L'estimation de l'alcalinité Gran (variable dépendante) s'est alors faite en incorporant la valeur de la somme des cations (variable indépendante) dans l'équation de la droite de régression. Les coefficients de corrélation pour ces droites de régression étaient de 0,94 et 0,97 pour le lac et pour l'exutoire respectivement. L'équation de la droite de régression pour le lac:

$$Y = 1{,}87x - 2{,}89$$

Et celle de l'exutoire:

$$Y = 1{,}96x - 3{,}26$$

2.2.3 **Les sulfates.**- Des résultats pour les concentrations de sulfates sont disponibles pour le lac et l'exutoire le 25 septembre 1990 ainsi que le 9 et le 23 octobre 1990. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de l'I.N.R.S.-Eau par chromatographie ionique. Les valeurs de sulfates de la banque de données du lac Laflamme proviennent de la méthode par colorimétrie. Toujours dans le but de respecter les caractéristiques de la banque de données, les résultats analytiques du laboratoire de l'I.N.R.S.-Eau ont été corrigés puisqu'une étude issue d'une série d'échantillons (réseau TADPA de mai 1990) analysés par les deux méthodes (colorimétrie et chromatographie ionique) démontre que la méthode par chromatographie ionique donne des valeurs systématiquement plus basses que par la méthode colorimétrique. Le coefficient de corrélation reliant les deux méthodes est de 0,97. Cependant puisque la pente et l'ordonnée à l'origine sont différentes de un et de zéro respectivement une correction a été jugée nécessaire. L'équation de la droite de régression pour corriger les valeurs de sulfates analysés par chromatographie ionique est:

$$\text{Colorimétrie} = 0{,}82\ (\text{chromatographie}) + 1{,}02$$

Des interpolations ont été faites pour les semaines du 2 et du 16 octobre 1990.

2.2.4 La conductivité, le pH, les nitrates, la couleur et les chlorures.- Des valeurs de conductivité et de pH mesurées par le laboratoire du ministère de l'énergie et des ressources du Québec sont disponibles pour le 11 et le 18 décembre 1990 et pour le 2, le 8, le 15 et le 22 janvier 1991 et ont été incorporées à la banque de données sans correction.

Des valeurs de nitrates mesurés par le laboratoire de l'I.N.R.S.-Eau sont disponibles pour le 25 septembre 1990 ainsi que le 9 et le 23 octobre 1990. Les valeurs de nitrates pour ces trois semaines étaient sous la limite de détection de 0,04 mg/l. La limite de détection pour les valeurs de nitrates de la banque de données du projet est de 0,01 mg/l. Depuis le début des études, des valeurs sous la limite de détection sont enregistrées du début de l'été jusqu'au mois d'octobre. Donc les valeurs sous la limite de détection, qu'elle soit à 0,01 mg/l ou à 0,04 mg/l, sont remplacées par zéro dans la banque de données sans qu'une erreur importante soit induite par cette estimation. Une interpolation à des valeurs sous la limite de détection a été faite pour les semaines du 2 et du 16 octobre 1990.

Aucun travail d'estimation n'a pu être fait pour les chlorures et la couleur. Les dates où il y a des valeurs manquantes sont présentées en annexe 1 et 2 ainsi que les valeurs estimées et les valeurs corrigées.

2.3 Changement de méthode analytique

2.3.1 Les métaux lourds.- La méthode analytique des métaux lourds a changé en mai 1990. Cependant aucune étude n'avait été faite jusqu'à cette date pour vérifier l'impact du changement analytique sur les séries temporelles. La figure 2 montre l'évolution temporelle des concentrations du fer pour le lac de 1981 à 1991. Un

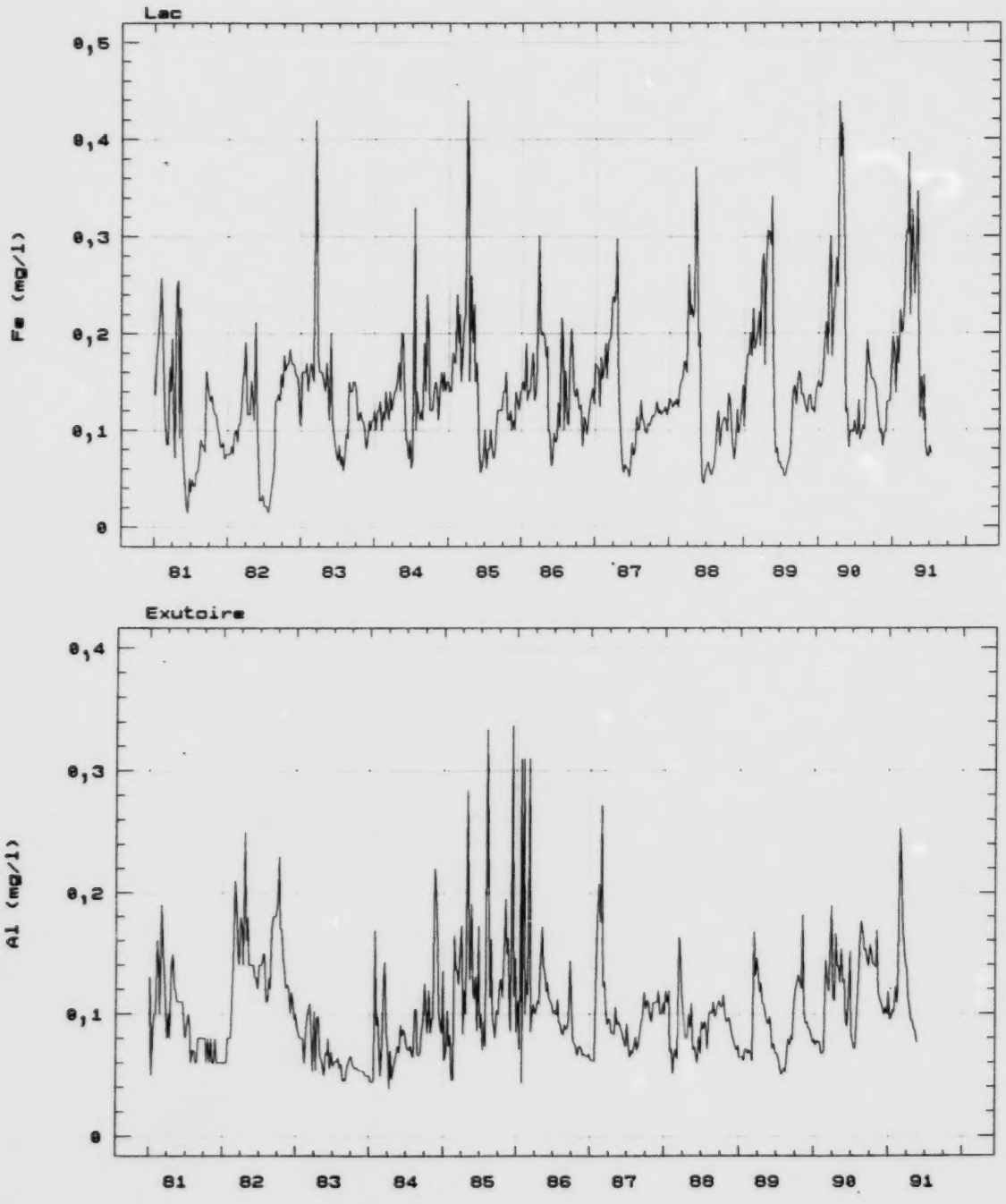


Figure 2 *Évolution temporelle des concentrations du fer au lac et de l'aluminium à l'exutoire suite au transfert de laboratoire (1983) et au changement analytique (1990)*

transfert de laboratoire, qui a eu lieu en 1983, (du laboratoire régional de Longueuil au laboratoire national de Burlington) a entraîné un léger écart, identifiable sur le graphique (figure 2), entre les concentrations de fer de 1981 et 1982 et celles des années suivantes. Mais lorsque soumis à des test statistiques, aucune tendance par saut n'est détectée pour cette période. Les mêmes tests statistiques de tendance par saut ont été effectués pour les séries temporelles du fer et de l'aluminium au lac et à l'exutoire pour vérifier l'existence d'un saut en mai 1990. Les résultats montrent qu'il y a une tendance par saut à l'exutoire pour l'aluminium (figure 2), c'est-à-dire que les concentrations d'aluminium à l'exutoire semblent plus élevées après mai 1990 qu'avant cette date. Les tests statistiques ont été effectués en divisant la série de deux façons: premièrement, la série de janvier 1981 à avril 1990 a été comparée à la série de mai 1990 à septembre 1991, puis la série de janvier 1988 à avril 1990 à celle de mai 1990 à septembre 1991. La série temporelle de la nouvelle méthode analytique est courte par rapport à la série de la méthode précédente, il faudra une série temporelle plus longue pour conclure définitivement à une tendance par saut créée par le changement de méthode analytique. Cette tendance par saut n'a pas entraîné de tendance monotone à la hausse pour la série de juin 1981 à mai 1991.

2.3.2 **Les cations majeurs.**- En août 1991, le laboratoire régional de Longueuil changeait la méthode analytique de trois des quatre cations majeurs (Ca, Mg, Na). De l'absorption atomique, la méthode a changé pour la spectrophotométrie d'émission (I.C.P.). La figure 3 compare les moyennes mensuelles de six années (1985-90) avec celles de 1991, il ne semble pas y avoir de sousestimation ni de surestimation systématique de la moyenne mensuelle. Aucune tendance par saut n'est détectée dans les séries temporelles du calcium, du magnésium et du sodium. Une comparaison des deux méthodes est documentée dans Bouchard (1991).

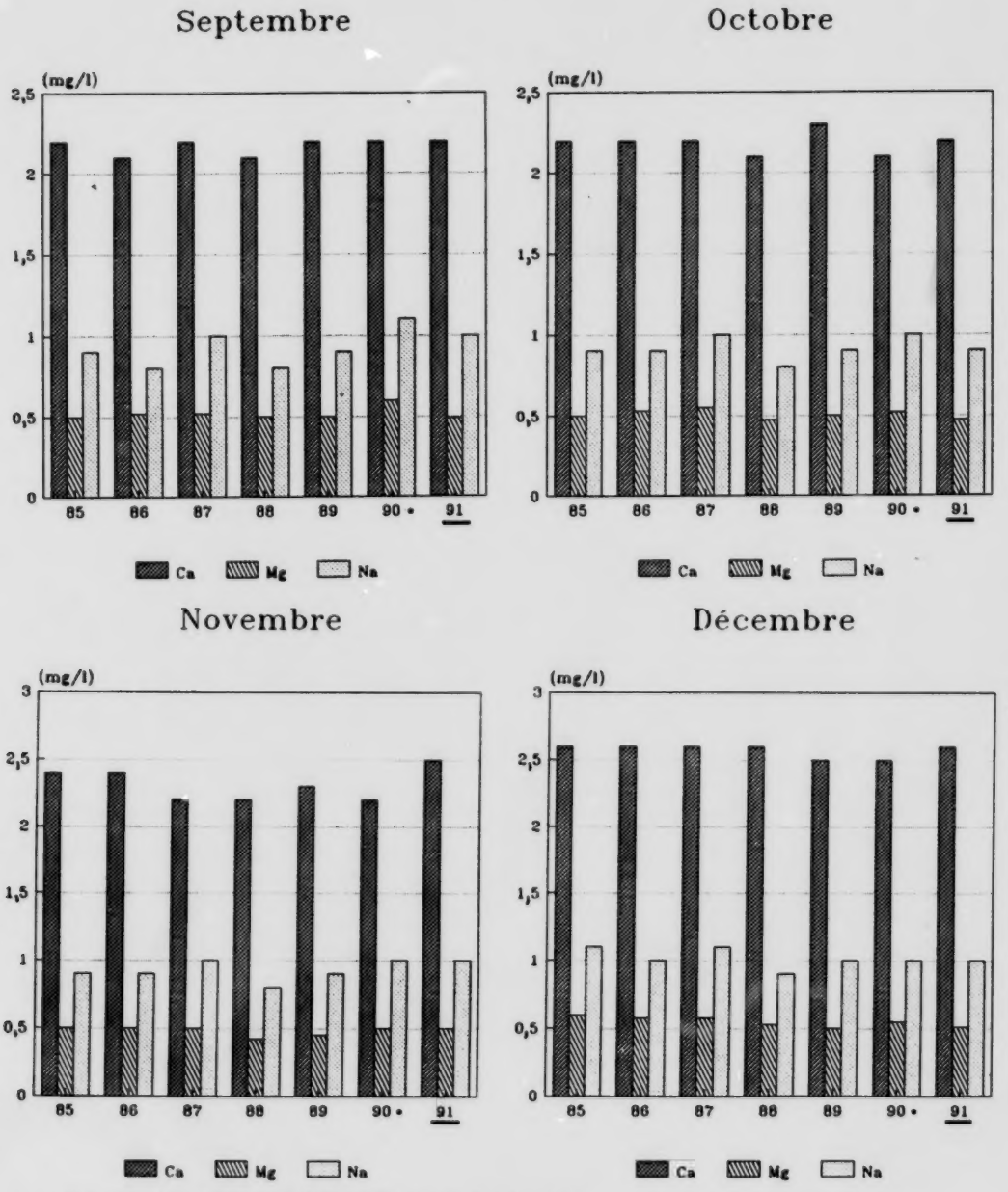


Figure 3 *Comparaison des moyennes mensuelles des cations majeurs après un changement de méthode en 1991*

3 LES PRÉCIPITATIONS

3.1 Le volume des précipitations

La région se caractérise par une quantité importante de précipitations où la neige représente en moyenne 34 p.100 du total annuel. Le tableau 4 montre les précipitations et l'écoulement au lac Laflamme par année hydrologique et par année civile. Le volume des précipitations de 1989 représente 87 p.100 de la moyenne des 10 années (1981-1990) tandis que le volume de 1990 représente 114 p.100 de la même moyenne. En terme d'année hydrologique, l'année 1988-89 représente 107 p.100 de la moyenne des neuf années hydrologiques. Le volume de précipitations pour l'année hydrologique 1989-90 représente 95 p.100 de la moyenne. Au niveau mensuel, on note les plus importants volumes aux mois de juin, juillet et novembre à chaque année.

3.2 La qualité des précipitations

Une étude montre que pour une année (année hydrologique), seulement 10 p.100 des évènements de pluie ou de neige représente en moyenne 45 p.100 de la charge annuelle de l'ion H^+ et 50 p.100 de la charge annuelle de sulfates. Ces évènements, où les précipitations sont considérablement chargées en ion H^+ et en sulfates, surviennent principalement au cours du mois de mai et en automne. Par exemple, au cours de l'année hydrologique 89-90, 18 sur 164 évènements représentant 50 p.100 de la charge annuelle des sulfates ont une concentration moyenne de sulfates de 3,01 mg/l (avec un minimum de 1,37 mg/l et un maximum de 7,42 mg/l) par rapport à la concentration moyenne annuelle qui est de 1,49 mg/l. Les volumes d'eau pour les 18 évènements atteignent en moyenne 14,5 mm de hauteur (minimum 3,8 et maximum 33,9 mm) par rapport à la moyenne annuelle qui est de 6,5 mm. Les évènements très chargés en sulfates s'expliquent la plupart du temps par une combinaison de concentration élevée en sulfates et d'un volume d'eau important. Le tableau 5 présente les moyennes annuelles pondérées des paramètres analysés pour les précipitations.

Tableau 4 ***Précipitations et écoulements annuels au lac Laflamme par année hydrologique et par année civile***

Année	Précipitations (cm)	Neige (cm)	Écoulement (cm)
Année hydrologique (de juin à mai)			
1981-1982	112,3	40	70,6
1982-1983	156,1	37	98,5
1983-1984	129,8	49	85,7
1984-1985	121,2	43	74,0
1985-1986	134,0	49	95,3
1986-1987	130,3	37	89,4
1987-1988	124,9	48	70,2
1988-1989	139,5	49	83,2
1989-1990	123,0	45	69,1
Moyenne	**130,1**	**44**	**81,8**
Année civile (de janvier à décembre)			
1981	132,8	34	93,2
1982	120,0	40	69,2
1983	162,2	56	99,9
1984	113,0	34	78,0
1985	128,4	40	82,2
1986	155,1	55	107,2
1987	111,7	26	71,0
1988	136,7	58	83,6
1989	115,4	40	75,1
1990	151,1	52	86,9
Moyenne	**132,6**	**44**	**84,6**

*Écoulement calculé à partir du débit (m^3/sec), du temps (1année) et de la superficie du bassin (m^2)

Tableau 5 *Moyennes annuelles pondérées des paramètres analysés pour les précipitations*

	pH	H (ug/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	NH_4 (mgN/l)	SO_4 (mg/l)	Cl (mg/l)	NO_3 (mgN/l)
81-82	4,40	39,4	0,09	0,01	0,10	0,02	0,12	1,64	0,15	0,25
82-83	4,51	31,1	0,06	0,01	0,06	0,02	0,12	1,38	0,12	0,20
83-84	4,41	38,7	0,18	0,03	0,16	0,03	0,22	1,83	0,31	0,29
84-85	4,29	51,2	0,14	0,02	0,06	0,02	0,18	2,02	0,19	0,34
85-86	4,45	35,8	0,06	0,01	0,02	0,01	0,15	1,29	0,09	0,26
86-87	4,42	37,7	0,06	0,01	0,03	0,01	0,17	1,32	0,06	0,29
87-88	4,44	36,7	0,07	0,02	0,04	0,02	0,17	1,38	0,07	0,32
88-89	4,40	39,9	0,12	0,03	0,04	0,02	0,21	1,58	0,08	0,35
89-90	4,45	35,5	0,08	0,03	0,05	0,02	0,20	1,38	0,09	0,32
Moyenne	**4,42(b)**	**38,4**	**0,10**	**0,02**	**0,06**	**0,02**	**0,17**	**1,54**	**0,13**	**0,29**
1981	4,56	27,6	0,09	0,01	0,08	0,02	0,13	1,44	0,08	0,20
1982	4,38	41,5	0,07	0,01	0,08	0,02	0,15	1,77	0,17	0,26
1983(a)	4,51	31,1	0,11	0,02	0,06	0,02	0,16	1,40	0,16	0,19
1984	4,35	44,2	0,16	0,02	0,03	0,03	0,20	2,06	0,29	0,30
1985	4,33	46,5	0,09	0,02	0,03	0,02	0,18	1,75	0,10	0,31
1986	4,48	33,1	0,05	0,01	0,02	0,01	0,14	1,15	0,06	0,22
1987	4,48	33,2	0,06	0,01	0,03	0,02	0,17	1,44	0,05	0,25
1988	4,38	41,7	0,10	0,03	0,05	0,02	0,23	1,77	0,09	0,34
1989	4,47	33,3	0,10	0,03	0,05	0,03	0,17	1,32	0,09	0,29
1990	4,51	30,7	0,09	0,02	0,05	0,03	0,19	1,24	0,08	0,27
Moyenne	**4,44(b)**	**36,3**	**0,09**	**0,02**	**0,05**	**0,02**	**0,17**	**1,53**	**0,12**	**0,26**

(a) Changement du réseau APN au réseau RECPA en juillet 1983
(b) La moyenne du pH est calculée à partir des concentrations de H^+

4 LE LAC, L'EXUTOIRE ET LES EAUX SOUTERRAINES

Un aspect important des mesures hydrologiques de 1990 au bassin versant du lac Laflamme est le débit de fonte (mois de mai) particulièrement faible par rapport à la moyenne des dix années (Environnement Canada, 1991). En effet, la hauteur d'eau écoulée au mois de mai 1990 est de 193,5 mm par rapport à 239,8 mm qui est la moyenne des mois de mai pour les dix années. Par contre les débits d'automne sont beaucoup plus élevés que la moyenne. Le mois d'octobre 1990 cumule une hauteur d'eau de 183 mm par rapport à 78 mm qui est la moyenne des mois d'octobre des dix années. La figure 4 montre l'hydrogramme de 1990.

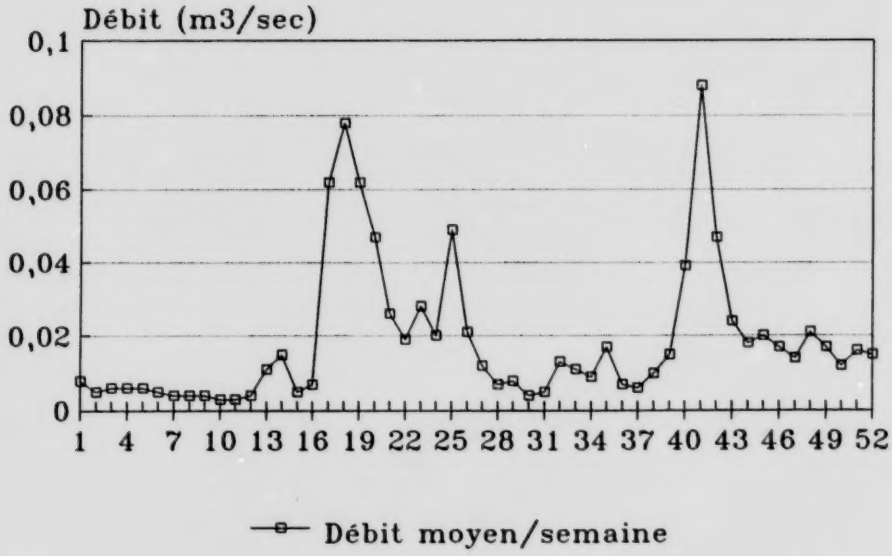


Figure 4 Hydrogramme (m^3/sec) de 1990 pour l'exutoire du lac Laflamme

Les tableaux 6 et 7 présentent les moyennes annuelles des paramètres de la qualité de l'eau du lac et de l'exutoire respectivement. Les concentrations des cations majeurs n'ont varié que très légèrement à la baisse de 1990 à 1991. Les concentrations annuelles de SO_4 au centre du lac ont diminué en 1990 et 1991 avec des valeurs de 4,1 mg/l et 3,7 mg/l respectivement. Cette baisse dans les concentrations de SO_4 est peut-être un premier signe d'amélioration de la qualité des eaux de surface suite à la baisse des émissions de SO_2 dans l'est de l'Amérique du Nord. On note cette baisse des concentrations annuelles de SO_4 à l'exutoire aussi. L'alcalinité du lac qui avait descendu à 4,58 mg/l (le plus bas niveau depuis 1981) est remontée à 5,10 mg/l en 1991 tout en demeurant sous la moyenne des 11 années. A l'exutoire l'alcalinité était à 3,8 mg/l en 1990 et est remontée à 4,18 mg/l en 1991. On note un comportement similaire en 1990 et 1991 pour le pH du lac et de l'exutoire.

Les valeurs présentées pour les eaux souterraines sont des valeurs moyennes calculées à partir de juillet 1988 jusqu'à novembre 1991. Le piézomètre profond (13 mètres) qui est situé dans une zone de décharge du lac, présente une qualité d'eau stable annuellement où l'alcalinité, le pH et les concentrations des cations majeurs sont très élevées. L'alcalinité moyenne est de 38,06 mg$CaCO_3$/l et le pH moyen est de 6,87. Ces valeurs élevées indiquent un long séjour d'environ 1 mois en contact avec les dépôts meubles du bassin (Bobba *et al.*, 1986). Les concentrations de sulfates qui sont associées aux précipitations acides présentent de faibles valeurs. La concentration moyenne des sulfates est de 2,8 mg/l par rapport à celle du lac qui est de 4,1 mg/l. Les concentrations de nitrates sont de l'ordre de 0,18 mg/l par rapport à 0,09 mg/l au lac.

Le piézomètre en surface (80 cm de profondeur) présente une grande variabilité annuelle des paramètres de la qualité de l'eau, principalement dû aux précipitations qui s'infiltrent dans cette première couche de sol. Ainsi les valeurs de pH varient entre 4,60 et 5,51 avec une valeur moyenne de 5,25. L'alcalinité varie entre 0,07 mg/l et 0,90 mg/l avec une concentration moyenne de 0,45 mg/l.

Tableau 6 *Moyennes annuelles des paramètres chimiques au centre du lac (1981-1991)*

Paramètre	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	Moyenne	É.-T.	Min-Max
pH(a)	6,41(j)	6,19	6,26	6,33	6,33	6,46	6,67	6,54	6,40	6,20(c)	6,34	6,24	—	5,6-7,0
H (µg/l)	0,387(j)	0,645	0,551	0,470	0,473	0,350	0,213	0,288	0,401	0,623(c)	0,457	0,569	1,28	0,1-25,1
Ca (mg/l)	2,2	2,6	2,4	2,4	2,5	2,4	2,4	2,3	2,4	2,3	2,3	2,4	0,4	1,3-3,7
Mg (mg/l)	0,47	0,54	0,54	0,53	0,54	0,53	0,55	0,53	0,49	0,52	0,51	0,52	0,09	0,26-0,80
Na (mg/l)	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,2	0,4-1,6
K (mg/l)	0,14	0,22	0,28	0,22	0,23	0,25	0,18	0,20	0,18	0,23	0,22	0,21	0,9	0-1,0
Cl (mg/l)	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5(d)	0,4(f)	0,4	0,1	0,1-1,1
SO_4 (mg/l)	4,1(j)	3,7	4,1	4,1	4,5	4,3	4,3	4,4	4,3	4,1(e)	3,7(f)	4,1	0,5	2,3-6,1
P (mg/l)	—	—	—	—	—	—	—	—	0,011	0,012	0,012	0,011	0,005	0,004-0,036
NO_3 (mg/l)	0,03	0,14	0,13	0,11	0,10	0,06	0,07	0,07	0,10	0,08(e)	0,08(f)	0,09	0,11	SLD-0,52
Alcalinité (mg/l)	4,35	6,75	5,39	5,50	5,50	5,07	5,46	5,05	5,00	4,58	5,10	5,28	1,72	1,08-10,05
Cond. (µS/cm)	18	28	24	22	26	24	25	23	23	23(c)	23	24	5	14-43
Couleur(b)	20	24	27	23	21	29	24	28	25	26(d)	23(f)	24	8	6-69
Al (mg/l)	0,087	0,119	0,069	0,072	0,110	0,109	0,081	0,091	0,084	0,108	0,110(h)	0,095	0,039	0,028-0,297
Mn (mg/l)	0,017	0,015	—	0,014	0,015	0,022	0,017	0,016	0,024	0,018	0,024(h)	0,020	0,013	SDL-0,080
Zn (mg/l)	0,006	0,003	0,004	0,004	0,006	0,006	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006(h)	0,005	0,002	SDL-0,017
Fe (mg/l)	0,082	0,111	0,126	0,133	0,142	0,142	0,129	0,129	0,154	0,168	0,197(h)	0,139	0,067	0,014-0,440

(a) pH calculé à partir de H^+
(b) Couleur exprimée en unité Hazen
(c)n=41 (d)n=38 (e)=43 (f)=48
Un changement de méthode analytique est survenu le 22 mai 1990 pour Al, Mn, Zn et Fe.
SLD = Sous la limite de détection.
(j) La moyenne du pH et de H^+ pour 1981 est calculée à partir du 27 avril, celle de SO_4 est calculée à partir du 14 juillet

Tableau 7 *Moyennes annuelles des paramètres chimiques à l'exutoire du lac (1981-1991)*

Paramètre	1981(b)	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	Moyenne	É.-T.	Min-Max
pH(a)	6,36(j)	6,08	6,04	6,20	6,16	6,35	6,56	6,42	6,21	6,00(c)	6,19(f)	6,21	—	5,0-7,0
H (ug/l)	0,433(j)	0,824	0,914	0,626	0,691	0,446	0,278	0,377	0,613	0,994(c)	0,648(f)	0,621	1,20	0,1-10
Ca (mg/l)	2,2	2,5	2,2	2,2	2,4	2,2	2,2	2,1	2,2	2,1	2,1	2,2	0,5	0,8-3,8
Mg (mg/l)	0,45	0,50	0,47	0,48	0,52	0,49	0,48	0,47	0,44	0,46	0,45	0,47	0,10	0,1-0,8
Na (mg/l)	0,9	1,0	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,2	0,1-1,4
K (mg/l)	0,13	0,20	0,27	0,17	0,22	0,22	0,14	0,17	0,15	0,17	0,15	0,18	0,09	SDL-1,5
Cl (mg/l)	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4(d)	0,3(f)	0,4	0,1	0,1-1,0
SO_4 (mg/l)	3,7(j)	3,8	4,1	4,2	4,8	4,4	4,3	4,5	4,4	4,2(e)	3,8(f)	4,2	0,6	3,0-9,6
P (mg/l)	—	—	—	—	—	—	—	—	0,009	0,007	0,008	0,007	0,004	SDL-0,032
NO_3 (mg/l)	0,05	0,14	0,12	0,10	0,09	0,07	0,05	0,07	0,08	0,06(e)	0,06(f)	0,09	0,10	SDL-0,45
Alcalinité (mg/l)	4,13	5,92	4,51	4,82	5,08	4,24	4,67	4,01	4,37	3,81	4,18	4,51	1,91	0,04-10,43
Cond. (uS/cm)	17	26	23	21	25	22	23	22	21	21(c)	21	22	5	12-40
Couleur	21	25	27	23	20	28	25	28	25	26(d)	24(f)	24	8	7-71
Al (mg/l)	0,092	0,129	0,078	0,075	0,123	0,124	0,095	0,096	0,117	0,102	0,122(e)	0,103	0,044	0,039-0,337
Mn (mg/l)	0,019	0,017	—	0,018	0,023	0,023	0,020	0,019	0,016	0,023	0,025(e)	0,021	0,015	SDL-0,073
Zn (mg/l)	0,005	0,003	0,004	0,003	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004(e)	0,004	0,002	SDL-0,011
Fe (mg/l)	0,085	0,119	0,109	0,112	0,146	0,117	0,133	0,121	0,134	0,177	0,193(e)	0,129	0,073	0,1-0,557

(a) pH calculé à partir de H^+
(b) Les données pour l'exutoire commence au mois de mars 1981
(c)n=41 (d)n=38 (e)n=43 (f)n=48
Un changement analytique est survenu le 22 mai 1990 pour Al, Mn, Zn et Fe.
SLD = Sous la limite de détection.
(j) La moyenne du pH et de H^+ pour 1981 est calculée à partir du 12 mai, celle du SO_4 est calculée à partir du 5 mai

Ce piézomètre enregistre des concentrations de sulfates élevées variant entre 4,50 mg/l et 5,60 mg/l et ayant une concentration moyenne de 5,04 mg/l. Les concentrations de nitrates sont faibles (0,09 mg/l), les nitrates étant assimilés par la végétation.

Les deux autres piézomètres sont situés dans la zone de recharge à proximité du lac et ont des profondeurs de 2,8 m et 2,9 m. L'eau de ces piézomètres, présente des concentrations se situant pour la plupart, entre les valeurs du piézomètre profond et celles du piézomètre de surface et ressemblant davantage à celle du lac. Les concentrations en cations majeurs sont du même ordre de grandeur pour ces deux piézomètres, avec 2,5 mg/l pour le calcium, 0,3 mg/l pour le magnésium et 1 mg/l pour le sodium. Les concentrations de potassium sont très variables selon la période de temps échantillonnée. On note des concentrations variant de 0,1 mg/l à 1,2 mg/l. Les concentrations de sulfates se tiennent autour de 4 mg/l pour les deux piézomètres. L'alcalinité moyenne est à 2,4 mg/l dans le piézomètre de 2,9 m de profondeur et à 3,2 mg/l dans celui de 2,8 m de profondeur. Les concentrations de nitrates sont à 1,1 mg/l et 0,8 mg/l dans les piézomètres de 2,9 m et 2,8 m de profondeur respectivement. Ces concentrations sont beaucoup plus élevées que celles du lac (0,09 mg/l).

5 CARACTÉRISTIQUES DES SÉRIES TEMPORELLES

Les tests statistiques utilisés pour détecter des tendances dans le temps sont adaptés aux caractéristiques des séries temporelles (Berryman, 1984). Ces caractéristiques sont:

-La présence d'une dépendance mutuelle entre les données; c'est-à-dire que le temps séparant les observations aura une influence sur la dépendance entre les observations. L'information de l'observation x_i peut inclure un peu de l'information de l'observation x_{i-1}.

-La distribution des données peut ne pas provenir d'une loi normale; c'est-à-dire que la distribution des fréquences des valeurs d'un paramètre autour de la moyenne peut être asymétrique.

-La présence de saisonnalité dans la série de données; c'est-à-dire que la valeur du paramètre varie saisonnièrement en fonction d'un cycle biogéochimique.

-La présence de données non-quantifiées ou tronquées; comme par exemple une valeur sous la limite de détection analytique.

-La présence d'intervalles non-réguliers; des données manquantes, qui peuvent être dûes à plusieurs facteurs (climat, transport, erreurs du laboratoire) entraînent une série temporelle où le pas de temps n'est pas constant.

5.1 Les séries du lac et de l'exutoire

Les séries temporelles traitées du lac et de l'exutoire débutent au mois de juin 1981 et se terminent au mois de mai 1990 avec un pas de temps hebdomadaire. Les séries temporelles des concentrations et des charges de sulfates débutent en juillet 1981. Lorsqu'une analyse de variance trouve une différence significative entre les moyennes mensuelles, on conclue qu'il y a saisonnalité et il est alors requis de regrouper les mois en saison. La division des séries temporelles, lorsqu'il y a saisonnalité dans les données est: été (juin, juillet et août), automne (septembre,

octobre et novembre), hiver (décembre, janvier et février) et printemps (mars, avril et mai).

La plupart des tendances détectées l'ont été avec le test de Kendall saisonnier. Le test de Kendall saisonnier est un test non-paramétrique utilisé lorsqu'il y a présence de saisonnalité et absence de persistance entre les données dans la série temporelle. Sinon, les tests de Spearman/Lettenmaier (absence de saisonnalité et présence de persistance) ou Hirch et Slack (présence de saisonnalité et de persistance) ont été utilisés. Le nombre d'observations se chiffre à 468 observations pour le lac et l'exutoire. Lorsqu'une tendance est détectée, le niveau initial et final de la série traitée ainsi que la pente de la tendance sont déterminés à l'aide de la droite de la régression de la série. Les tableaux 8 et 9 résument les tendances statistiquement significatives présentes dans les séries temporelles des paramètres de la qualité de l'eau du lac, de l'exutoire et des précipitations.

Les séries temporelles des chlorures, de la conductivité, du magnésium, de l'aluminium et du zinc ne présentent pas de tendance, pas plus au lac qu'à l'exutoire. Les séries temporelles du phosphore au lac et à l'exutoire ont subi un changement analytique en 1988. Les séries ne sont pas encore assez longues pour être testées. Les concentrations de l'ion hydrogène ont montré une tendance à la baisse lorsque les séries 1981-1985, 1981-1986, 1981-1987, 1981-1988 et 1981-1989 au lac et à l'exutoire ont été testées. Cette tendance ainsi que celle dans les charges ont disparu en testant la série 1981-1990. La tendance à la baisse dans les charges de bicarbonates exportées à l'exutoire est disparue avec la série juin 1981-mai 1990; elle était présente dans la série 1981-1989. Une tendance à la baisse des concentrations de fer était présente dans les séries de 1981-1989 pour le lac ainsi que pour l'exutoire. Ces tendances (lac et exutoire) à la baisse ont disparu pour la série juin 1981-mai 1990. Il faut noter cependant que le transfert de laboratoire survenu en 1983 pour les analyses des concentrations de fer pourrait avoir entraîné cette tendance à la hausse puisqu'il n'y a aucune tendance pour la série 1983-1990. Les séries de

l'ion ammonium et du carbone organique dissous débutant en 1985 avec une fréquence bimestrielle, ne présentent pas de tendance temporelle pour la période 1985-1990. Les séries de débit n'ont jamais montré de tendance temporelle. Les nouvelles tendances apparaissant avec la série 1981-1990 sont les tendances à la baisse pour le potassium et le sodium à l'exutoire et la tendance à la hausse du manganèse au lac (de janvier 1984 à décembre 1990). Au niveau des précipitations, les nouvelles tendances sont celles à la hausse des concentrations de magnésium et de l'ion ammonium.

Tableau 8 Tendances dans les séries temporelles des concentrations pour le lac, l'exutoire et les précipitations (juin 1981 à mai 1990).

Paramètre	Tendance	Test	Niveau initial (mg/l)	Niveau final (mg/l)	Écart (mg/l)	Pente
LAC						
Alcalinité Gran	à la baisse	KS	5,73	4,99	0,74	-0,085
Calcium	à la baisse	KS	2,42	2,35	0,07	-0,008
Sulfates	à la hausse	SL	3,87	4,47	0,60	0,069
Nitrates	à la baisse	KS	0,090	0,062	0,028	-0,003
Couleur(a)	à la hausse	KS	22,22	27,03	4,81	0,55
Manganèse	à la hausse	KS	0,017	0,019	0,002	—
EXUTOIRE						
Alcalinité Gran	à la baisse	KS	5,07	4,06	1,01	-0,116
Calcium	à la baisse	KS	2,31	2,19	0,12	-0,014
Sulfates	à la hausse	HS	3,97	4,72	0,76	0,086
Nitrates	à la baisse	KS	0,103	0,055	0,048	-0,003
Couleur(a)	à la hausse	KS	23,12	25,81	2,69	0,307
Potassium	à la baisse	KS	0,199	0,153	0,046	-0,005
Sodium	à la baisse	KS	0,912	0,857	0,055	-0,006
PRÉCIPITATIONS						
Nitrates	à la hausse	KS	0,210	0,363	0,153	0,018
Ammonium	à la hausse	KS	0,124	0,184	0,060	0,007
Magnésium	à la hausse	SL	0,011	0,024	0,013	0,001

(a) Les unités pour la couleur sont les unités Hazen
KS = Kendall saisonnier HS = Hirsh et Slack SL = Spearman/Lettenmaier

Tableau 9 Tendances dans les séries temporelles des charges mensuelles pour les précipitations et l'exutoire (juin 1981 à mai 1990)

Paramètre	Tendance	Test	Niveau initial (kg/ha/mois)	Niveau final (kg/ha/mois)	Écart (kg/ha/mois)	Pente
PRÉCIPITATIONS						
Sulfates	à la baisse	SL	1,89	1,31	0,58	-0,067
Ammonium	à la hausse	KS	0,147	0,194	0,047	0,005
Magnésium	à la hausse	SL	0,013	0,024	0,011	0,001
Chlorures	à la baisse	SL	0,181	0,057	o,124	-0,014
EXUTOIRE						
Nitrates	à la baisse	KS	1,083	1,045	0,038	-0,004

KS = Kendall saisonnier SL = Spearman/Lettenmaier HS = Hirch et Slack

En étudiant les tendances significatives qui sont présentes au lac, on note que la diminution des anions de 4,3 µéq/l correspond bien à la diminution des cations de 3,5 µéq/l. Au lac, l'augmentation des concentrations de sulfates (12,5 µéq/l) est compensée par une diminution des concentrations de HCO_3 (14,8 µéq/l), l'augmentation des concentrations de sulfates pouvant difficilement être reliée à la diminution du calcium (3,5 µéq/l). A l'exutoire, la diminution des anions est de 7,8 µéq/l, tandis que celle des cations est de 9,6 µéq/l. Encore ici l'augmentation des concentrations de sulfates (15,8 µéq/L) est compensée par la diminution des concentrations de HCO_3 (20,2 µéq/l).

5.1.1 **L'alcalinité Gran.**- L'alcalinité a un comportement saisonnier où l'on retrouve les valeurs les plus basses au printemps et les valeurs les plus hautes en hiver. Une tendance monotone décroissante de l'alcalinité a été détectée pour l'eau

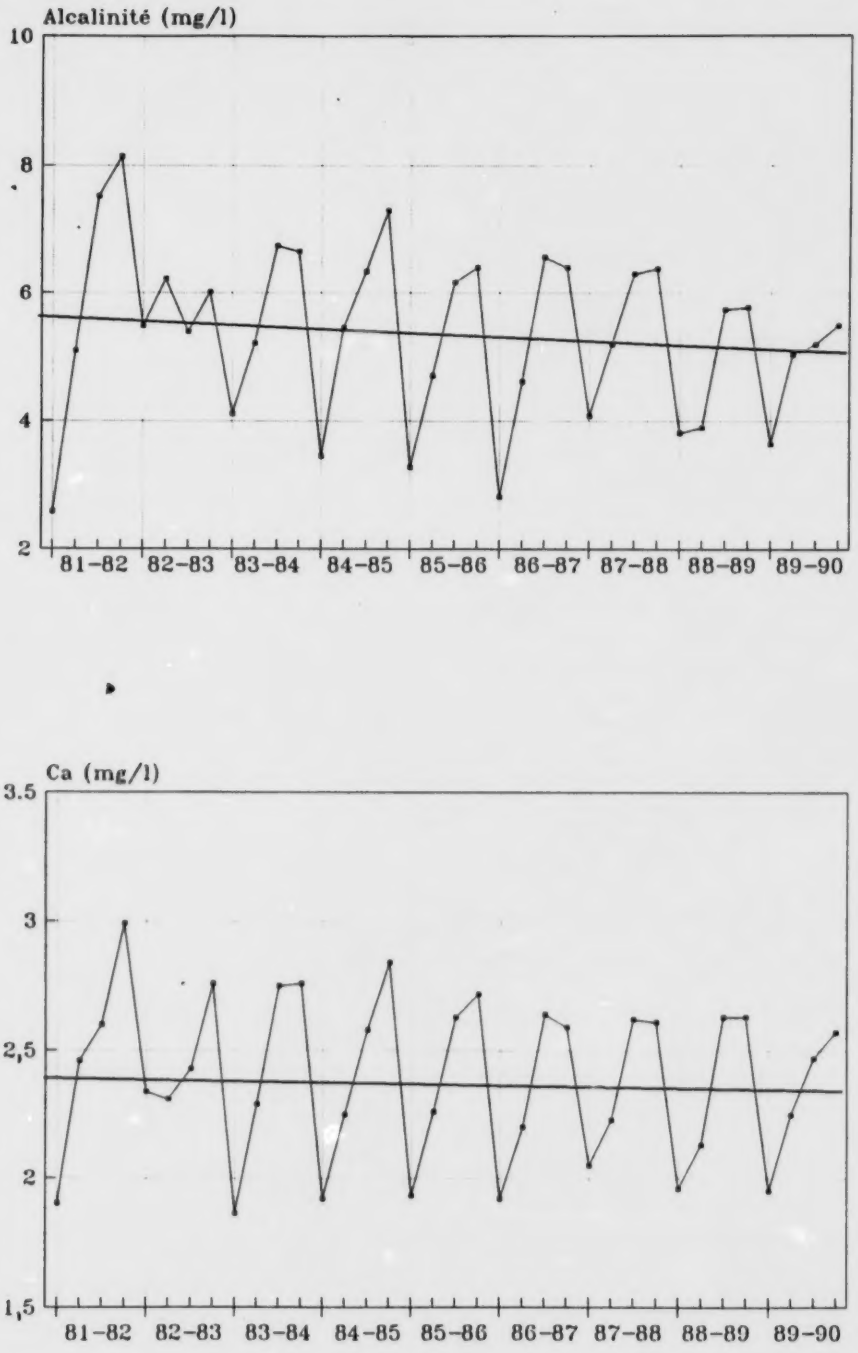


Figure 5 *Séries temporelles saisonnières de l'alcalinité Gran et des concentrations de calcium au lac (juin 1981-mai 1990)*

du lac (figure 5) et de l'exutoire. Au lac, le niveau initial de la série traitée se situait à 5,73 mg/l et atteignait un niveau final de 4,99 mg/l, soit une différence de 0,74 mg/l. Cet écart représente 13 p.100 du niveau initial. A l'exutoire, cet écart monte à 1,01 mg/l, soit 20 p.100 du niveau initial, le niveau initial étant de 5,07 mg/l et le niveau final de 4,06 mg/l. Au lac comme à l'exutoire, il semble que ce soit le printemps qui contribue le plus à la tendance monotone décroissante. Par exemple au lac, la pente de la tendance générale est de -0,085 en comparaison avec la pente de la tendance pour la période printanière qui est de -0,213. La tendance à la baisse de l'alcalinité Gran a été détectée une première fois avec la série de juin 1981 à mai 1985 au lac seulement. Cette tendance a disparu en 1986 et 1987 pour revenir avec la série du lac de 1981-1988. En 1989, elle était toujours présente au lac et apparaissait à l'exutoire dans les séries de concentrations et dans les séries de charges.

5.1.2 **Le calcium.**- Pour les deux stations (lac et exutoire), une tendance monotone décroissante est détectée (figure 5) pour les concentrations de calcium. Le comportement saisonnier du calcium est semblable à celui de l'alcalinité (élevé en hiver et bas au printemps). Pour le lac, le niveau initial de la série traitée se situait à 2,42 mg/l pour finir à un niveau final de à 2,35 mg/l. L'écart de 0,07 ne représente que 3 p.100 du niveau initial et cet écart n'atteint pas plus de 5 p.100 à l'exutoire. La pente de la tendance au lac est de -0,008 et de -0,014 à l'exutoire. C'est le printemps qui contribue le plus à la tendance monotone décroissante de la série. La tendance à la baisse des concentrations de calcium est apparue en 1988 pour le lac et en 1989 pour l'exutoire (concentration seulement).

5.1.3 **La couleur.**- Il existe une tendance monotone croissante dans la couleur de l'eau du lac et de l'exutoire détectée par un test de Kendall saisonnier. La couleur est saisonnière atteignant ses valeurs minimales en hiver et ses valeurs maximales en été. Le niveau initial de la série de données du lac était de 22,22 unités et augmentait

à 27,03 unités au niveau final. L'écart de 4,81 représente 22 p.100 du niveau initial. A l'exutoire, le niveau initial était de 23,12 unités et atteint 25,81 unités en niveau final. Cet écart de 2,69 représente 12 p.100 du niveau initial. Au lac tandis que la pente de la tendance pour la série entière est de 0,55, la pente de la tendance pour les mois d'hiver est de 1,30. A l'exutoire, les saisons d'automne, d'hiver et de printemps contribuent à la tendance monotone croissante de façon à peu près égale. Par contre, l'été à l'exutoire, on note que la pente de la tendance est négative. Ce comportement va dans le sens inverse de la tendance générale. En testant la série temporelle 1981-1985 de la couleur pour le lac et l'exutoire une tendance à la baisse était détectée. Cette tendance a disparu (lac et exutoire) lorsque les séries 1981-1986 et 1981-1987 ont été testées, par contre, à partir de 1988 une tendance à la hausse est apparue pour les séries du lac et de l'exutoire. Au début de 1982, la méthode analytique de la couleur a changé. Ce changement analytique semble contribuer à la présence d'une tendance, puisque la série testée de 1982-1990 ne montre aucune tendance.

5.1.4 **Le potassium et le sodium.**- Une tendance monotone décroissante est détectée par le test de Kendall saisonnier pour les concentrations de ces deux paramètres à l'exutoire seulement. Le niveau initial de la série de données pour le potassium à l'exutoire est de 0,199 mg/l et diminue à 0,153 mg/l. L'écart de 0,046 représente 23 p.100 du niveau initial. Le sodium a un niveau initial de 0,912 mg/l et un niveau final de 0,857 mg/l. L'écart est de 0,055 et équivaut à 6 p.100 du niveau initial. Les pentes des tendances sont respectivement de -0,005 et de -0,006 pour le potassium et pour le sodium. Pour le potassium, c'est le printemps qui contribue de façon importante à la tendance globale. Pour le sodium, l'automne et le printemps contribuent de façon semblable à la tendance.

5.1.5 **Les nitrates.**- Les concentrations de nitrates dans l'eau du lac et de l'exutoire ont un comportement saisonnier très prononcé. Les valeurs maximales sont

atteintes au printemps et chutent sous la limite de détection au cours de l'été. Le test de Kendall saisonnier détecte une tendance monotone décroissante pour les concentrations de nitrates dans l'eau du lac et de l'exutoire. Au lac, le niveau initial de la série traitée était de 0,090 mg/l et subissait une réduction de 0,028 mg/l soit un niveau final de 0,062 mg/l. La réduction de 0,028 mg/l représente 31 p.100 du niveau initial. A l'exutoire, le niveau initial était de 0,103 mg/l et le niveau final de 0,055 mg/l, une réduction de 0,048 mg/l qui représente 46 p.100 du niveau initial. La pente de la tendance est de -0,003 pour le lac et de -0,005 pour l'exutoire.

Il n'y a que pour ce paramètre qu'une tendance (à la baisse) est détectée dans les charges mensuelles à l'exutoire. Le niveau initial de la série s'élevait à 1,073 kg/ha pour s'abaisser à 1,028 kg/ha. Cette réduction de 0,045 kg/ha ne représente que 4,2 p.100 de la valeur initiale. La pente de la droite est de -0,005. Cette tendance à la baisse est présente depuis 1985 à l'exutoire et depuis 1986 au lac.

5.1.6 Les sulfates.- Les tests statistiques identifie un comportement saisonnier des concentrations de sulfate ont un comportement saisonnier uniquement à l'exutoire. A cette station, parce qu'il y a de la saisonnalité et de la persistance dans les données, un test de Hirsh et Slack a été utilisé et détecte une tendance monotone croissante dans la série temporelle des concentrations de sulfates. Le niveau initial est de 3,965 mg/l et augmente à 4,721 mg/l, soit un écart de 0,756 mg/l représentant 19 p.100 de la valeur initiale. La pente de la tendance est de 0,086. En considérant uniquement les données hivernales, la pente de la tendance augmente à 0,115.

Étant donné la non-saisonnalité de la série temporelle des concentrations de sulfates au lac, le test de Spearman/Lettenmaier est utilisé et détecte une tendance monotone croissante pour la série. Le niveau initial de la série traitée était de 3,87 mg/l et a augmenté à 4,47 mg/l. L'écart est de 0,60 mg/l et représente 15 p.100 du niveau initial. La pente de la tendance est de 0,069. La figure 6 montre l'évolution temporelle des concentrations de sulfates pour le lac.

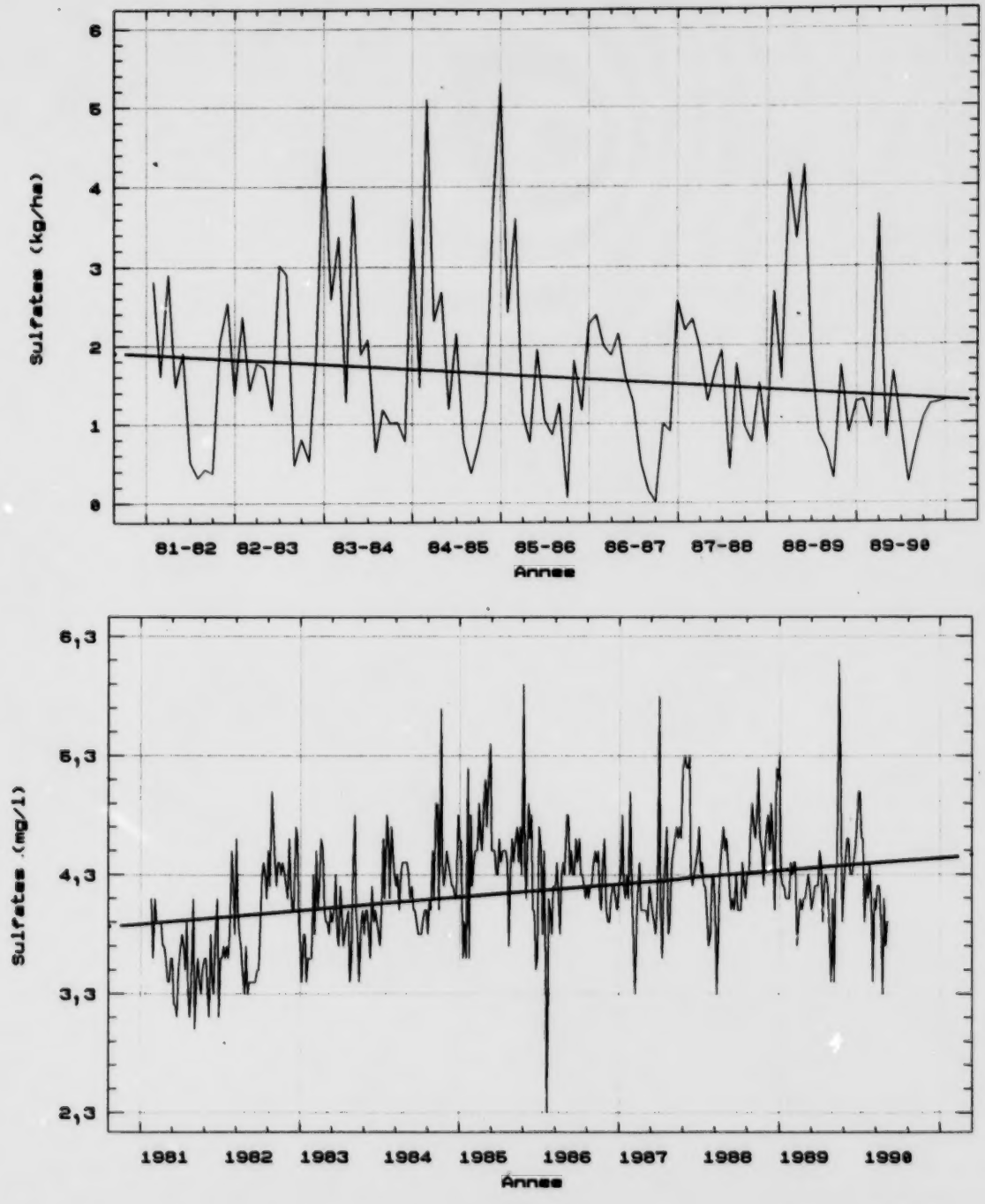


Figure 6 *Évolution temporelle des concentrations de sulfates au lac et des charges atmosphériques de sulfates (juin 1981-mai 1990)*

La tendance à la hausse des concentrations de sulfates au lac et à l'exutoire était présente depuis 1985, avec une absence d'un an (série 1981-1987). Un test de tendance pour la série des concentrations au lac et à l'exutoire de 1985 à 1990 ne montre aucun résultat significatif. Une tendance à la baisse dans les concentrations de sulfates (lac et exutoire) pour cette période aurait pu mettre en évidence une réponse du bassin versant suite aux réductions des émissions de SO_2 dans l'est du Canada.

5.1.7 Le manganèse.- La série temporelle des concentrations de manganèse montre une tendance à la hausse au lac pour la période de janvier 1984 à décembre 1990. La tendance fut détectée par le test de Kendall saisonnier. Le niveau initial de la série est à 0,017 mg/l et la niveau final à 0,019 mg/l. L'écart de 0,002 mg/l représente 12 p.100 de la valeur initiale.

5.2 Les séries des précipitations

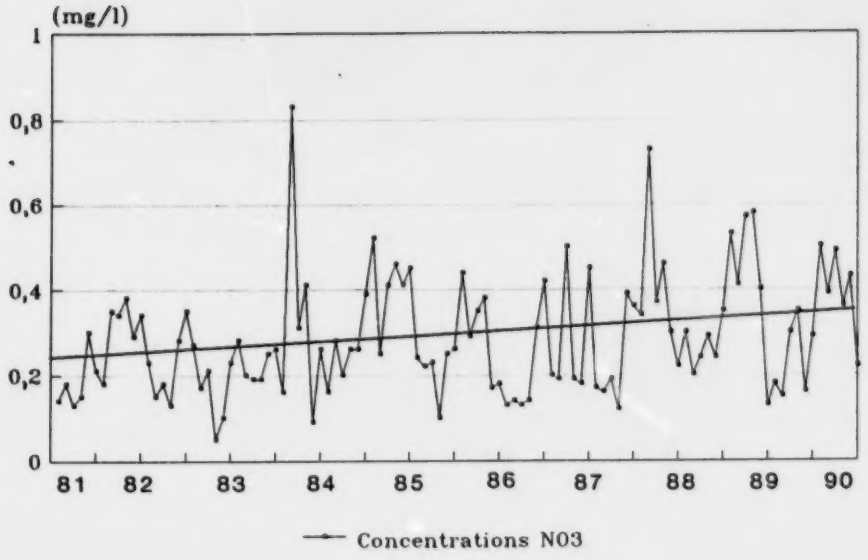
Les données journalières sur la quantité et la qualité des précipitations sont fournies par le service atmosphérique d'Environnement Canada (Barrie *et al*, 1982, 1984; Wiebe *et al*, 1985; Vet *et al*, 1986, 1988a, 1988b, 1989). Il y a 108 observations dans les séries temporelles des concentrations des paramètres de qualité des précipitations considérant un pas de temps mensuel. Comme pour le lac et l'exutoire, les séries de précipitations s'échelonnent de juin 1981 à mai 1990. Les charges atmosphériques quotidiennes sont calculées en multipliant à chaque jour la concentration du paramètre avec le volume de précipitation. La charge mensuelle est ensuite calculée et corrigée pour tenir compte des précipitations qui n'ont pas été analysées. Les tests pour détecter des tendances temporelles pour le volume des précipitations ont toujours été négatifs.

Les séries temporelles des concentrations et des charges ont été testées pour l'ion H^+, le calcium, le potassium et le sodium sans qu'aucune tendance ne soit

détectée (1981-1990). Des tendances à la hausse sont détectées pour les séries de concentrations et de charges atmosphériques du magnésium. Le changement de réseau (APN - RECPA) qui a eu lieu en juillet 1983 et qui a entraîné un changement dans la méthode de validation des résultats ne semble pas avoir contribué à la tendance croissante puisque la série 1983-1990 montre aussi une tendance à la hausse.

Au niveau de l'électroneutralité, la correspondance entre les changements des anions et celui des cations est moins évidente qu'au lac et à l'exutoire lorsque l'on évalue les tendances pour les précipitations. La hausse des concentrations de nitrates (10,9 µéq/l) pourrait être compensée par la hausse de l'ion ammonium (environ 6 µéq/l) et par la baisse des sulfates et des chlorures, même si ces tendances à la baisse ne sont pas statistiquement significatives.

5.2.1 **Les nitrates-**. Il y a une tendance monotone croissante détectée dans la série temporelle des concentrations de nitrates des précipitations (figure 7). Le niveau initial de la série traitée était à 0,210 mg/l et augmentait à 0,363 mg/l au niveau final. L'écart de 0,153 mg/l entre le niveau initial et le niveau final représente 73 p.100 du niveau initial. La pente de la tendance est de 0,018. Ce sont les séries d'hiver (décembre, janvier et février) qui contribuent le plus à la tendance à la hausse. Il y a présence de saisonnalité dans la série temporelle avec les valeurs les plus basses rencontrées en été. Les séries temporelles des concentrations et des charges atmosphériques de nitrates de 1981-1985 montrent une tendance monotone à la hausse. Il en est de même pour la série de 1981-1986. Pour la série 1981-1987 aucune tendance, soit pour les concentrations soit pour les charges, n'est détectée au niveau des nitrates. Pour la série de 1981-1988, les tendances à la hausse des concentrations et des charges de nitrates réapparaissent. La série 1981-1989 montre une tendance à la hausse uniquement pour les concentrations de nitrates, tout comme pour la série de 1981-1990 d'ailleurs.



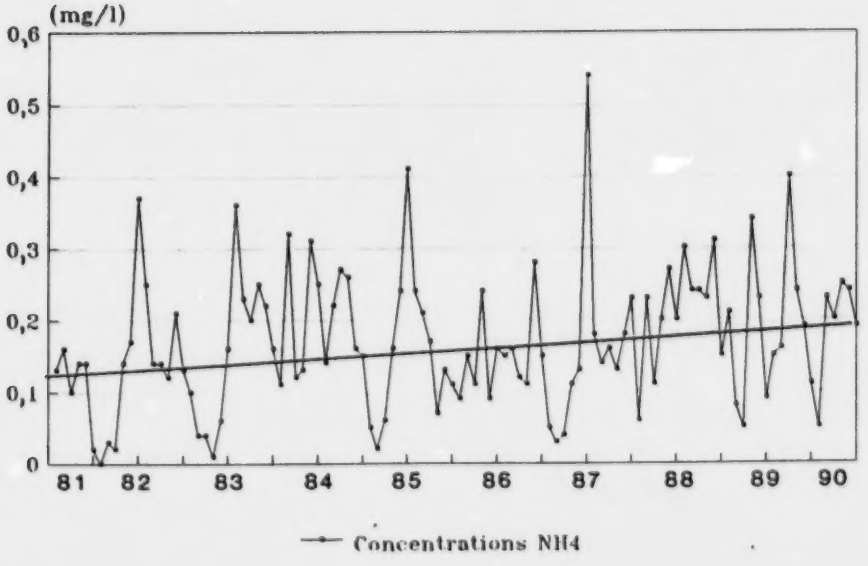


Figure 7 *Tendances à la hausse dans les concentrations mensuelles des composés azotés des précipitations (juin 1981-mai 1990)*

5.2.2 L'ion ammonium-. Les concentrations des composés azotés dans les précipitations sont à la hausse puisque l'on détecte aussi une tendance monotone croissante dans les concentrations d'ammonium (figure 7). Il y a présence de saisonnalité dans la série, avec les valeurs les plus élevées en été et les valeurs les plus basses en hiver. Le niveau initial de la série temporelle est de 0,124 mg/l pour finir à 0,184 mg/l. Cette différence de 0,060 mg/l représente 48 p.100 de la valeur initiale. La pente de la droite est de 0,007.

Cette même tendance à la hausse se retrouve dans les charges mensuelles atmosphériques, avec un niveau initial de 0,147 kg/ha/mois et un niveau final de 0,194 kg/ha/mois. La différence de 0,047 kg/ha/mois représente 32 p.100 de la valeur initiale. Historiquement, les séries de 1981-1985 et de 1981-1986 montrent des tendances à la hausse dans les charges atmosphériques de l'ion ammonium. Cette tendance disparaît lorsque l'on teste la série de 1981-1987, pour ensuite revenir avec les séries de 1981-1988 et 1981-1989.

5.2.3 Les sulfates-. Une tendance à la baisse dans les charges atmosphériques mensuelles de sulfates est détectée pour la série de juin 1981 à mai 1990 (figure 6). Cette tendance est apparue suite à l'ajout des données de précipitations de 1990. Le niveau initial de la série était de 1,894 kg/ha/mois et le niveau final de 1,306 kg/ha/mois, soit une différence de 0,59 kg/ha/mois, donc 7,2 kg/ha/an. Cette différence représente 31 p.100 de la valeur initiale. La pente de la tendance est de -0,067. La figure 6 montre l'évolution temporelle des charges atmosphériques de sulfates pour le bassin versant du lac Laflamme. Il aura fallu une diminution de 31 p.100 dans les charges atmosphériques de sulfates pour que les tests non-paramétriques détectent une tendance à la baisse statistiquement significative.

6 LA RÉPONSE DU BASSIN VERSANT AU STRESS ACIDE

6.1 Les indicateurs d'exposition

6.1.1 Les charges atmosphériques de sulfates.- Les charges atmosphériques de sulfates, ont augmenté entre 1981 et 1985, pour ensuite diminuer de 1986 à 1987 (tableau 10). En 1988, les dépositions atmosphériques de sulfates atteignaient des maxima depuis 1981. En 1989 et 1990 les dépositions de sulfates ont diminué, de 24 kg/ha qu'elles étaient en 1988, elles sont passées à 14 kg/ha puis à 16 kg/ha en 1989 et en 1990 respectivement. De cette évolution temporelle des charges atmosphériques de sulfates résulte une tendance à la baisse pour la période de juin 1981 à mai 1990. Boulet et Pinard (1991) constatent une diminution de 20 p.100 des charges atmosphériques de sulfates dans la région de l'Abitibi. Dans le sud du Québec (station de Sutton en Estrie) l'évolution temporelle des précipitations acides montre une diminution des concentrations de sulfates de 3,3 p.100 par année pour la période de juin 1984 à juin 1991.

6.1.2 Les concentrations de sulfates dans les eaux de surface.- Dupont et Grimard (1986) démontrent bien la corrélation existant entre les concentrations de sulfates dans les précipitations et leur effet à la hausse sur les concentrations de sulfates dans les lacs de la région méridionale du Québec (le coefficient de corrélation atteignant de 0,85). Tel que traduit par les concentrations de sulfates des eaux souterrainnes, les dépositions atmosphériques de sulfates font varier considérablement les concentrations des eaux de surface. Ainsi, les concentrations moyennes de sulfates au lac sont de l'ordre de 85,3 µéq/l par rapport à 54 µéq/l pour les concentrations moyenne de sulfates du piézomètre profond (13 m). Les concentrations naturelles de sulfates des eaux de suface seraient représentées par les concentrations de sulfates des eaux souterraines profondes.

Tableau 10 ***Charges annuelles pour les paramètres de qualité des précipitations analysés au lac Laflamme (kg/ha)***

Année	Hauteur de précipitation (m)	SO_4	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	Cl	Ca	Na	H^+	K	Mg
1981	1,33	19,4	2,91	1,77	1,12	1,25	1,22	0,38	0,27	0,19
1982	1,20	21,1	3,36	1,74	2,11	0,93	1,07	0,50	0,22	0,13
1983	1,62	24,0	3,17	2,44*	2,94*	1,91	0,77*	0,52	0,39	0,26
1984	1,13	23,2	3,66	2,27	1,99*	1,55*	0,71*	0,51	0,30	0,27
1985	1,28	23,1	4,12	2,32	1,35	1,15	0,39	0,62	0,21	0,21
1986	1,55	18,4	3,49	2,30	0,90	0,83	0,34	0,53	0,20	0,19
1987	1,12	16,5	2,86	2,01	0,60	0,68	0,29	0,38	0,21	0,14
1988	1,37	24,6	4,73	3,20	1,19	1,39	0,62	0,58	0,30	0,35
1989	1,15	14,4	3,21	1,92	0,93	1,04	0,51	0,36	0,28	0,30
1990	1,51	16,7	3,63	2,52	1,07	1,18	0,63	0,41	0,34	0,30
Moyenne	**1,31**	**20,14**	**3,51**	**>2,25**	**>1,42**	**>1,19**	**>0,66**	**0,48**	**0,27**	**0,23**
81-82	1,12	18,3	----	1,69	1,51	0,95	0,95	0,43	0,20	0,13
82-83	1,56	22,6	----	2,23	1,86	0,95	0,89	0,52	0,30	0,15
83-84	1,30	23,3	4,05	2,85*	3,53*	2,43*	0,90*	0,47	0,38	0,34
84-85	1,21	27,0	4,38	2,41	1,19*	1,30*	0,49*	0,66	0,28	0,23
85-86	1,34	18,3	3,46	2,12	1,20	0,83	0,33	0,48	0,20	0,18
86-87	1,30	16,4	2,83	2,04	0,67	0,72	0,29	0,44	0,16	0,16
87-88	1,25	17,6	3,99	2,23	0,89	0,86	0,50	0,46	0,27	0,22
88-89	1,40	23,6	4,45	2,98	1,06	1,46	0,49	0,55	0,32	0,34
89-90	1,23	15,1	3,15	2,28	0,96	0,90	0,60	0,37	0,29	0,27
Moyenne	**1,30**	**20,25**	**3,76**	**>2,31**	**>1,43**	**>1,16**	**>0,60**	**0,49**	**0,27**	**0,22**

** Résultats partiels lorsque moins de 50 p. 100 de la hauteur de précipitation ont été analysés.*

Les concentrations de sulfates des eaux souterraines profondes sont considérées comme les concentrations naturelles de sulfates, puisqu'elles ne sont pas influencées par les apports atmosphériques d'origine anthropique, la provenance des sulfates de ces eaux est naturelle. Par contre, dans le cas du lac Laflamme, la série temporelle des dépositions atmosphériques de sulfates (juin 1981 à mai 1990) montre une tendance nette à la baisse, tandis que les concentrations de sulfates au lac et à

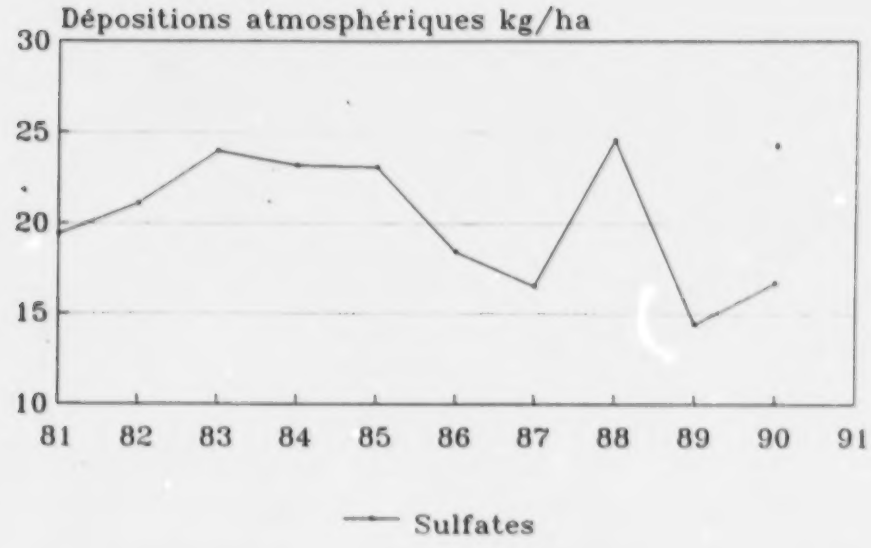
l'exutoire montrent une tendance nette à la hausse. Les tendances à la hausse dans les concentrations de sulfates sont de l'ordre de 15 p.100 au lac et de 19 p.100 à l'exutoire. Il n'y a pas de tendance significative dans les concentrations de sulfates au lac ou à l'exutoire pour la série 1985-1990. Comme mentionné précédemment, l'existence d'une tendance à la baisse pour ces séries aurait pu indiquer une réponse du bassin versant suite aux réductions des émissions de SO_2 dans l'est du Canada depuis 1985.

Une étude sur l'évolution temporelle des moyennes mensuelles des concentrations de SO_4 au lac montre que les moyennes mensuelles des mois de juin suivent assez bien le patron des dépositions atmosphériques annuelles de sulfates. Pour les concentrations de SO_4 du lac au mois de juin, tout comme pour les dépositions atmosphériques annuelles de sulfates, on note une hausse entre 1981 et 1985, puis une baisse entre 1986 et 1987 avec un pic (à la hausse) en 1988, puis finalement une baisse en 1989 et 1990 (figure 8). Ce sont pour les mois de janvier, février que la tendance à la hausse des concentrations de sulfates au lac est le plus visible (figure 9).

Le déphasage dans la réponse des eaux de surface par rapport aux dépositions atmosphériques peut trouver une explication dans la présence de dépôts secs et dans la présence de sulfates stockés dans les sols. Ces différentes sources sont expliquées plus loin dans ce chapitre.

6.1.3 Les charges atmosphériques de nitrates.- Contrairement aux dépositions de sulfates, les composés azotés des précipitations ne montrent pas d'amélioration. En effet, les charges atmosphériques et les concentrations de l'ion ammonium des précipitations montrent des tendances à la hausse, ainsi que les concentrations des nitrates des précipitations.

La relation directe entre les dépositions atmosphériques et les concentrations dans les eaux de surface, n'est pas démontrée dans le cas des nitrates.



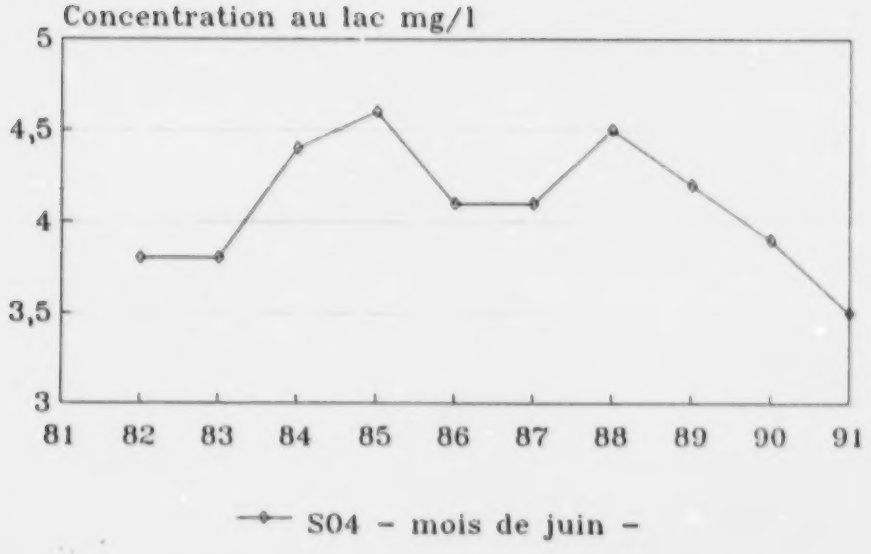
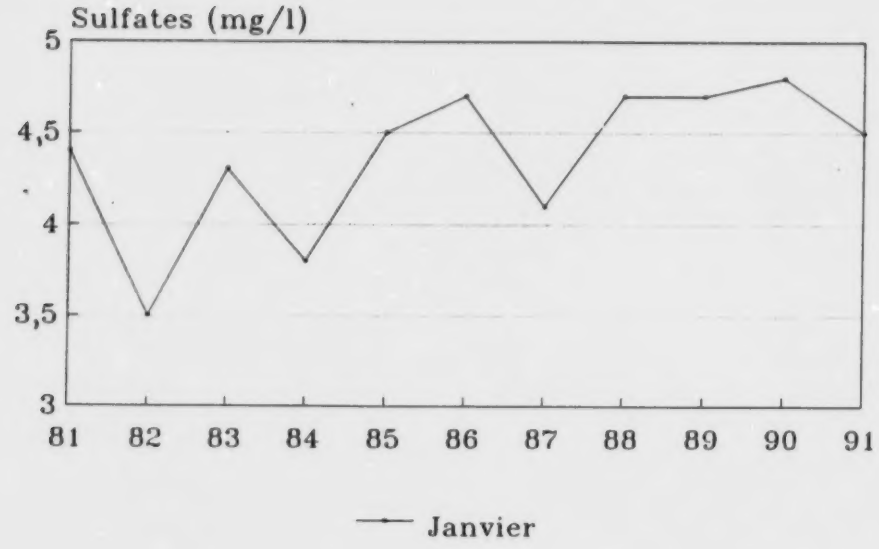


Figure 8 *Comparaison des charges atmosphériques annuelles de sulfates et des concentrations moyennes de sulfates au lac pour les mois de juin*



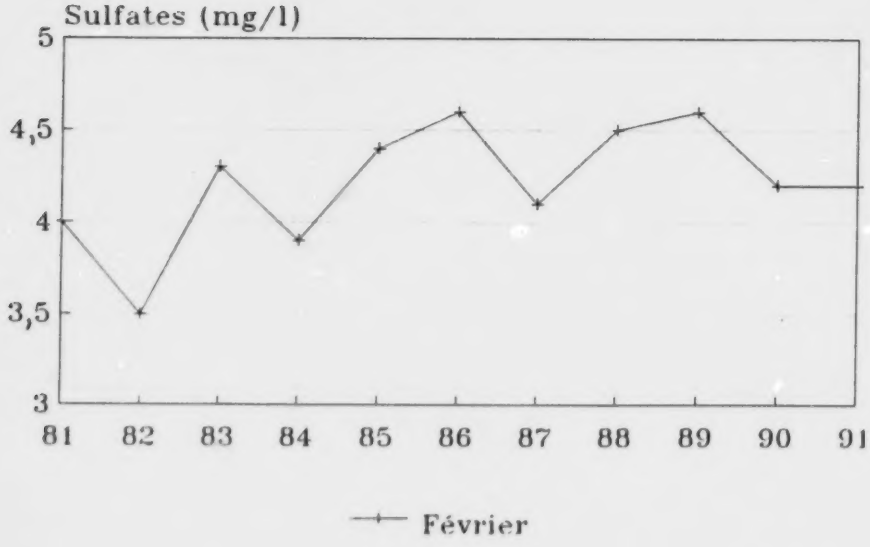


Figure 9 ***Évolution des moyennes mensuelles des concentrations de sulfates du lac des mois de janvier et février***

Ce même phénomène est observé sur le territoire québécois par Dupont (1988, 1989, 1990, 1991). Une assimilation des nitrates par la végétation interfère dans la relation déposition atmosphérique-concentration des eaux de surface ce qui entraînerait une mauvaise corrélation. L'évolution temporelle des concentrations d'ammonium de l'eau du lac au cours d'une année est semblable à celle des nitrates avec des maxima à la fin de l'hiver et des minima en été et au début de l'automne. Un bon indicateur pour démontrer l'acidification par HNO_3 est la présence de nitrates au cours de la saison de croissance des végétaux. En effet, en été au lac Laflamme, les nitrates sont complétement assimilés par la végétation (facteur limitant), les concentrations de ce paramètre tombent sous la limite de détection au cours de cette période. La présence éventuelle de nitrates au lac Laflamme pendant l'été, pourrait indiquer une accumulation d'origine anthropique de cet élément dans le système.

6.2 Les indicateurs d'effet

6.2.1 Le rapport bicarbonates/sulfates

Une des conséquences du processus d'acidification des écosystèmes aquatiques est le remplacement progressif des bicarbonates par les sulfates dans les eaux de surface. On utilise le rapport bicarbonates/sulfates comme outil pour mettre en évidence l'acidification d'un système et identifier les périodes où les concentrations de sulfates sont supérieures à celles des bicarbonates. Pour le lac, les moyennes annuelles sont toujours supérieures à l'unité (tableau 11). Les moyennes mensuelles du rapport bicarbonates/sulfates au lac descendent sous l'unité au cours des mois de juin et juillet. La figure 10 montre l'évolution temporelle du rapport au lac et à l'exutoire, sur un pas de temps hebdomadaire pour l'année 1989. Cette année est représentative de ce phénomène sur l'ensemble de la période de mesure. Le rapport tombe sous l'unité rapidement lors de la fonte printanière au mois de mai atteignant un minimun de 0,6 et de 0,01 pour le lac et l'exutoire respectivement.

Tableau 11 Les rapports annuels de bicarbonates/sulfates au lac et à l'exutoire par année hydrologique

Année	Rapport pour le lac	Pourcentage de semaine < 1	Rapport pour l'exutoire	Pourcentage de semaine < 1
1982-83	1,50	6	1,19	37
1983-84	1,42	21	1,28	31
1984-85	1,37	29	1,13	46
1985-86	1,20	37	0,97	60
1986-87	1,20	38	1,00	56
1987-88	1,28	21	1,04	50
1988-89	1,10	50	0,92	71
1989-90	1,16	33	0,96	54

Le rapport HCO_3/SO_4 augmente graduellement au cours de la saison estivale, tout en restant sous l'unité. Il redevient supérieur à un au mois d'août. C'est principalement la variation des concentrations de HCO_3 qui fait varier le rapport comme le montre la figure 11. L'effet saisonnier de l'alcalinité se produit à chaque année. Pour le lac, sur l'ensemble d'une année, le rapport HCO_3/SO_4 est inférieur à l'unité en moyenne 29 p.100 du temps (sur une base hebdomadaire).

Si on les compare au lac, les rapports bicarbonates/sulfates de l'exutoire sont presque toujours inférieurs. Ceci s'explique par le fait que l'eau s'écoulant vers l'exutoire provient surtout de la couche superficielle du lac (les deux premiers mètres). Cette couche superficielle est grandement influencée par les précipitations et l'écoulement printanier qui représentent des apports acides considérables. Les moyennes annuelles du rapport HCO_3/SO_4 de l'exutoire sont sous l'unité pour 3 années hydrologiques. A l'exutoire, au cours d'une année, le rapport est inférieur à l'unité durant un peu plus de la moitié du temps (51 p.100 sur une base hebdomadaire).

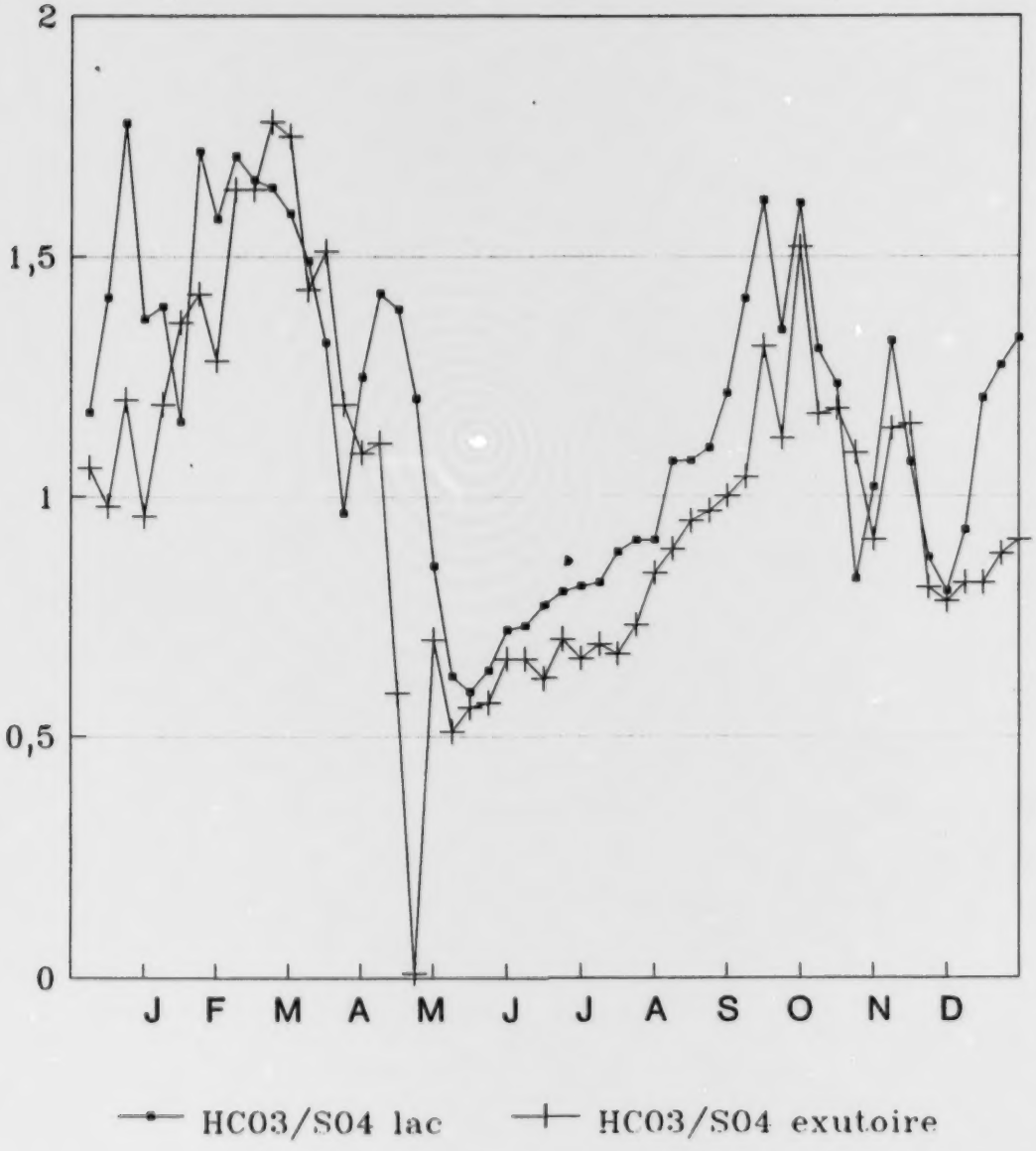


Figure 10 *Évolution temporelle du rapport bicarbonates/sulfates pour 1989 au lac et à l'exutoire*

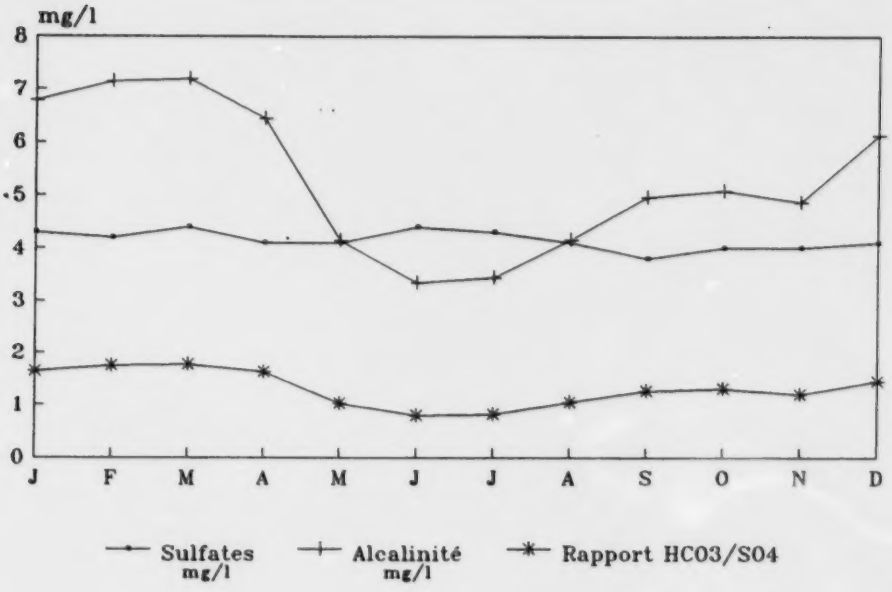


Figure 11 ***Moyennes mensuelles des concentrations de sulfates et de l'alcalinité du lac et le rapport bicarbonates/sulfates (1981-1990)***

6.2.2 La baisse de l'alcalinité des eaux de surface

La diminution de l'alcalinité au lac et à l'exutoire est de 13 p.100 et de 20 p.100 respectivement. Lors de la fonte printanière, au moment où les apports acides sont importants, l'alcalinité descend en deça de 1 mg/l. Une tendance à la baisse de l'alcalinité du lac est apparue en testant la série temporelle de 1981-1985. Elle est disparue avec la série 1981-1986, pour réapparaître à l'exutoire avec la série temporelle de 1981-1987. Elle est présente (tendance à la baisse) au lac et à l'exutoire pour les séries 1981-1989 et juin 1981-mai 1990. Le processus de perte d'alcalinité est donc présent depuis déjà quelques années au bassin du lac Laflamme. Les figures présentant l'évolution des moyennes mensuelles de l'alcalinité sont présentées en annexe 3. Les moyennes mensuelles montrent bien la tendance à la baisse qui existe pour la période de juin 1981 à mai 1990.

6.3 Les bilans chimiques comme indicateurs

Les tableaux 10 et 12 présentent la charge totale annuelle (civile et hydrologique) de plusieurs paramètres pour les précipitations et l'exutoire. Le tableau 13 présente les écarts entre les charges atmosphériques annuelles et les charges annuelles qui sortent à l'exutoire pour huit paramètres (annexes 4 et 5).

6.3.1 Les sulfates.- Les bilans annuels des sulfates ne sont pas à l'équilibre, c'est-à-dire qu'en moyenne les intrants (apports atmosphériques humides) ne représentent que 60 p.100 des extrants (exportation à l'exutoire) soit une différence d'environ 13 kg/ha pour 1988, 1989 et 1990 (figure 12). Le même phénomène est observé depuis plusieurs années en Ontario pour les bassins versants du lac Plastic et du lac Harp (APIOS, 1991). Ce phénomène peut s'expliquer par l'existence d'autres sources de sulfates soit les dépôts secs ou les sulfates stockés dans le sol. Selon Houle et Carrignan (1992), la quantité de soufre stocké dans le sol serait considérablement plus importante que le flux annuel de sulfates en terme de retombées atmosphériques et de sortie à l'exutoire du lac.

Outre les dépositions atmosphériques humides de sulfates, on compte parmi les autres sources importantes de ce paramètre, les dépôts secs, le stock du sol ainsi que tout les phénomènes reliant le soufre atmosphérique et la végétation. Selon Robitaille (1990), les concentrations de SO_4^{2-} des eaux d'égouttement (lessivage du feuillage) et des eaux d'écoulement le long des fûts (lessivage des troncs d'arbre) augmentent d'un facteur de 1,4 et de 3,3 respectivement par rapport aux concentrations de SO_4^{2-} des précipitations incidentes.

Houle et Carrignan (1992) rapportent que l'on retrouve dans le sol du bassin versant du lac Laflamme une importante quantité de soufre sous plusieurs formes. Ainsi en cumulant les quantités de sulfates des divers horizons du sol (LHF, Ae Bhf, Bf et C), il y aurait environ 17 fois plus de sulfates dans le sol que dans la charge atmosphérique annuelle de sulfates du bassin. Il est à noter que l'assise

Tableau 12 **Charges annuelles exportées à l'exutoire du lac Laflamme (en kg/ha)**

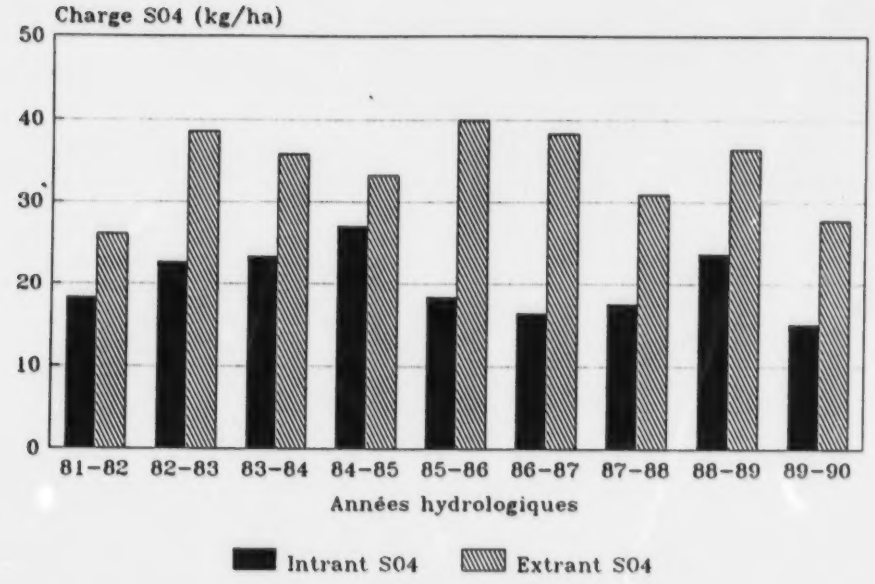
Paramètre	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
SO_4	—*	26,80	38,82	34,18	38,21	43,59	30,64	37,23	27,45	30,35p
Alcalinité	28,75	31,37	33,44	25,45	29,87	31,29	27,03	27,47	20,40	27,01
Ca	19,57	15,74	18,07	15,03	16,72	20,23	14,04	16,49	12,18	16,61
Na	6,94	5,82	6,50	5,74	6,12	7,29	5,81	6,43	4,42	7,14
Mg	3,93	3,06	3,59	3,23	3,46	4,46	3,10	3,59	2,36	3,72
Cl	2,91	3,13	4,21	2,92	3,19	4,15	2,39	2,98	2,03	1,98p
K	1,53	1,55	4,38	1,16	2,00	2,74	0,99	1,36	1,06	1,53
NO_3	1,59	1,21	1,14	0,92	0,90	0,59	0,43	0,48	0,58	0,49p
Al	1,07	1,08	0,83	0,65	1,11	1,42	0,87	0,88	0,71	1,14
Fe	0,84	0,80	1,09	0,89	0,98	1,07	0,81	0,97	0,93	1,21
Mn	0,21	0,13	0,24	0,15	0,19	0,27	0,11	0,14	0,14	0,15
Zn	0,04	0,02	0,04	0,03	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03
H	0,020	0,011	0,024	0,010	0,010	0,009	0,003	0,004	0,009	0,014p

Paramètre	81-82	82-83	83-84	84-85	85-86	86-87	87-88	88-89	89-90
SO_4	26,10	38,62	35,82	33,21	39,95	38,33	30,94	36,41	27,77
Alcalinité	26,59	34,97	30,03	27,04	30,03	28,83	27,13	24,69	20,82
Ca	15,60	18,55	16,54	14,80	18,43	17,15	14,28	15,67	12,77
Na	5,71	6,90	6,25	5,62	6,25	6,81	5,86	5,88	4,97
Mg	3,03	3,59	3,60	3,08	3,81	3,94	3,18	3,21	2,63
Cl	2,32	4,52	3,42	2,79	3,66	3,35	2,43	2,72	2,25
K	1,43	3,83	1,98	1,57	2,48	1,65	1,12	1,27	1,24
NO_3	1,01	1,37	0,98	0,90	0,60	0,42	0,47	0,57	0,50
Al	0,83	1,21	0,67	0,76	1,42	1,15	0,74	0,88	0,71
Fe	0,67	1,14	1,01	0,92	0,94	0,99	0,87	1,06	0,97
Mn	0,19	0,24	0,16	0,18	0,23	0,16	0,11	0,16	0,13
Zn	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02
H	0,010	0,025	0,010	0,010	0,008	0,004	0,004	0,010	0,014

* surestimation analytique de SO_4 jusqu'en juillet 1981
p = résultats partiels

Tableau 13 Les écarts (kg/ha) entre les charges atmosphériques et les charges sortant à l'exutoire pour 1981 à 1990

Année	SO_4	NO_3	Cl	Ca	Na	H^+	K	Mg
1981	--	1,32	-1,79	-18,3	-5,72	0,360	-1,26	-3,74
1982	-5,7	2,15	-1,02	-14,8	-4,75	0,489	-1,33	-2,93
1983	-14,8	2,03	-1,27	-16,2	-5,73	0,496	-3,99	-3,33
1984	-10,9	2,74	-0,93	-13,4	-5,03	0,500	-0,86	-2,96
1985	-15,1	3,22	-1,84	-15,5	-5,73	0,610	-1,79	-3,25
1986	-25,1	2,90	-3,25	-19,4	-6,95	0,521	-2,54	-4,27
1987	-14,1	2,43	-1,79	-13,3	-5,52	0,377	-0,78	-2,96
1988	-12,6	4,25	-1,79	-15,1	-5,81	0,576	-1,06	-3,24
1989	-13,0	2,63	-1,10	-11,1	-3,91	0,351	-0,78	-2,06
1990	-13,6	3,14	-0,91	-15,4	-6,51	0,396	-1,19	-3,42
81-82	-7,8	----	-0,81	-14,6	-4,76	0,420	-1,23	-2,90
82-83	-16,0	----	-2,66	-12,6	-6,01	0,495	-3,53	-3,44
83-84	-12,5	3,07	0,11	-14,1	-5,35	0,460	-1,60	-3,26
84-85	-6,21	3,48	-1,60	-13,5	-5,13	0,650	-1,29	-2,85
85-86	-21,6	2,86	-2,46	-17,6	-5,92	0,472	-2,28	-3,63
86-87	-21,9	2,41	-2,68	-16,4	-6,52	0,436	-1,49	-3,78
87-88	-13,3	3,52	-1,54	-13,4	-5,36	0,456	-0,85	-2,96
88-89	-12,8	3,88	-1,66	-14,7	-5,39	0,540	-0,95	-2,87
89-90	-12,6	2,65	-1,29	-11,8	-4,37	0,356	-0,95	-2,36



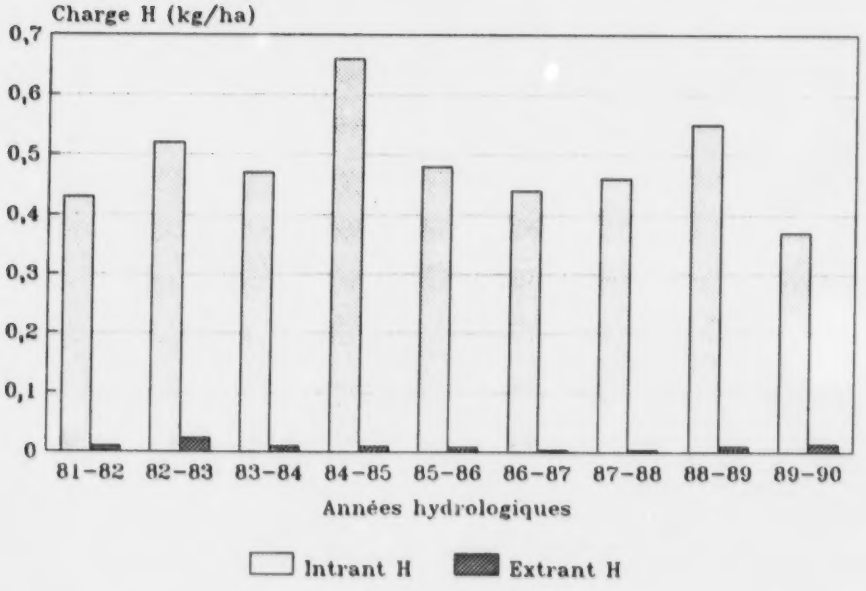


Figure 12 Bilan ionique annuel des sulfates et de l'ion hydrogène

rocheuse du bassin versant du lac Laflamme est pauvre en S. Toujours selon Houle (1992), on retrouverait en moyenne 1,5 kg/ha de sulfates solubles dans l'horizon LHF et Ae, l'horizon Bhf contiendrait 7,5 kg/ha de sulfates solubles et 14,1 kg/ha de sulfates adsorbés. C'est dans l'horizon Bf que l'on retrouverait la plus grande quantité de sulfates avec en moyenne 51,3 kg/ha de sulfates solubles et 288,9 kg/ha de sulfates adsorbés. L'horizon C contiendrait environ 10 kg/ha et 21 kg/ha de sulfates solubles et adsorbés respectivement. Cette quantité importante de sulfates dans le sol soulève l'intérêt de l'effet de réservoir du sol et de sa contribution au bilan annuel des sulfates.

Une étude au lac Plastic et sur les berges de la rivière Grande (Grand River) en Ontario, met en évidence la déposition atmosphérique du soufre et les effets de la végétation sur cette déposition (Van Stempvoort *et al.*, 1991). Sur ces sites, le couvert forestier influence la déposition du soufre de plusieurs façons:

- Les dépôts par le brouillard et les dépôts secs de soufre augmentent lorsque la végétation capte les SO_4 particulaires d'origine atmosphérique et absorbe le SO_2.
- De 10 à 35 p.100 des précipitations sont interceptées par le couvert végétal, pour éventuellement s'évaporer. Cette évaporation entraîne une déposition de sulfates sur la surface végétale.
- Les feuilles absorbent le SO_2 atmosphérique et le bioassimile en soufre organique. Elles incorporent aussi les SO_4 de la pluie et des aérosols qui se déposent sur leurs surfaces cuticulaires. Une partie de ce soufre incorporé rejoindra le sol via la litière (la chute de feuilles) ou les racines par excrétion.
- La pluie tombant sur le feuillage peut causer le lessivage ou entraîner les exudats de sulfates ou de soufre organique provenant de la plante et qui étaient originellement absorbés sous forme de sulfates au niveau du sol.
- Les bactéries et les champignons vivant dans le couvert forestier peuvent oxyder le SO_2 atmosphérique et le soufre organique des plantes en sulfates. Les bactéries peuvent aussi bioassimiler les sulfates atmosphériques en soufre organique et recycler ce soufre en sulfates via la minéralisation.

L'étude conclue que les dépositions atmosphériques sont les sources majeures de S pour les écosystèmes du sud et du centre de l'Ontario même si l'assise rocheuse est riche en S. En plus des sulfates contenus dans les précipitations, les eaux d'égouttement et les eaux d'écoulement le long des fûts contiennent de 0 à 60 p.100 de sulfates provenant du couvert végétal. Ces sulfates proviennent des aérosols (sulfates particulaires), du SO_2 atmosphérique oxydé, du soufre organique minéralisé et finalement d'un peu de lessivage de sulfates provenant de la plante. Les feuillus semblent absorber davantage de SO_2 et/ou de sulfates que les conifères sauf peut-être au printemps. Aux stations à l'étude, les concentrations de sulfates des eaux d'égouttement et des eaux d'écoulement le long des fûts sont principalement expliquées par l'oxydation du SO_2 et/ou la minéralisation du soufre organique sur le feuillage. La minéralisation du soufre organique pourrait contribuer à plus de 35 p.100 des concentrations de sulfates des eaux d'égouttement et à plus de 55 p.100 des concentrations de sulfates des eaux d'écoulement le long des fûts. Les sulfates seraient d'origine atmosphérique et recyclés par l'activité microbiennes plutôt que du soufre organique du feuillage.

Une étude sur les bilans saisonniers des sulfates montre qu'au printemps il y a un relarguage des sulfates, les intrants ne représentant que 40 p.100 des extrants (figure 13). Ce relarguage pourrait être dû à la présence de sulfates dans le couvert de neige et dans le sol et d'un apport par la matière organique dans la neige (Jones, 1990) et dans sol.

Au lac Laflamme, c'est en été que les sulfates sont les plus souvent conservatifs, c'est-à-dire que les intrants équivalent à peu près aux extrants. La figure 13 montre cependant les exceptions comme les étés 1985 et 1986. Robitaille et Boutin (1990) trouvent un équilibre au niveau des flux de sulfates pour la période de juin à octobre. L'addition du flux des eaux d'égouttement (13,24 kg/ha) et de celui des eaux d'écoulement le long des fûts (0,89 kg/ha) correspond très bien au flux à l'exutoire (14,36 kg/ha) pour cette même période de temps (Robitaille et Boutin, 1990).

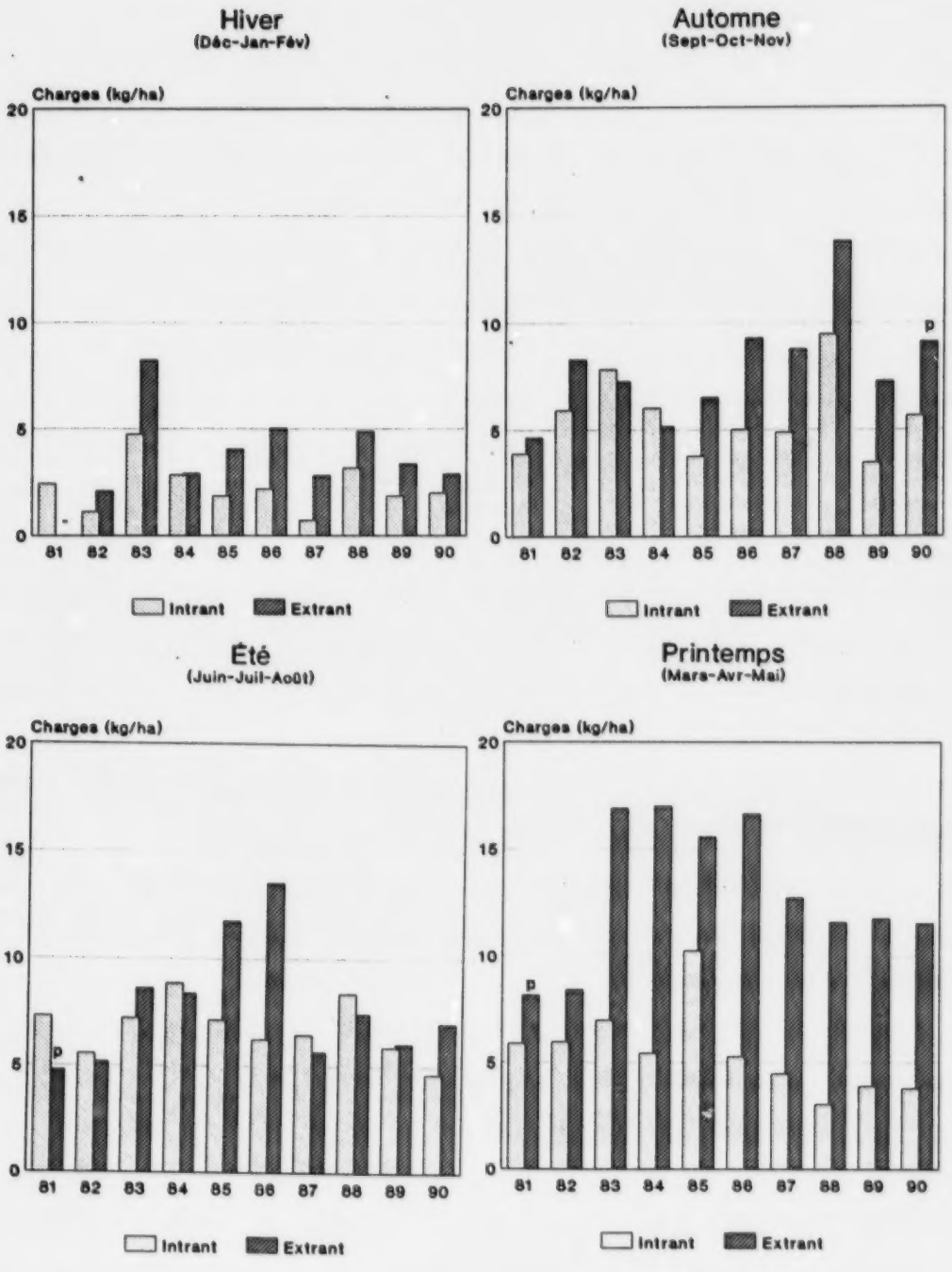


Figure 13 Bilan ionique saisonnier des sulfates

Robitaille et Boutin semblent attribuer ce phénomène d'équilibre aux apports supplémentaires de SO_4 (outre les apports des précipitations humides) par les dépôts secs et le lessivage.

La corrélation entre les charges atmosphériques et les charges à l'exutoire de sulfates est faible (r^2 = 0,41) sur un pas de temps mensuel. L'écart entre les charges atmosphériques et les charges à l'exutoire a toujours été négatif. Cet écart a sensiblement augmenté de 1988 à 1990.

6.3.2 Les cations majeurs.- Sur une base annuelle, les cations majeurs (Ca, Mg, Na, K) sont lessivés du système. Les intrants ne représentant pas plus de 15 p.100 des extrants (sauf pour K) comme le montre les figures 14 et 15. Les cations majeurs proviennent en grande partie de l'altération de la roche en place et des dépôts meubles du bassin versant. Lors des échanges avec les minéraux carbonatés les ions H^+ sont captés tandis qu'il y a libération des cations majeurs. Comparativement à un écosystème aquatique qui n'est pas soumis aux précipitations acides, on s'attend à ce que l'acidité des précipitations mette en circulation une quantité additionnelle d'ion H^+, entrainant une libération accrue des cations majeurs ou d'aluminium. Au lac Laflamme il y a une tendance à la baisse pour certaines concentrations de cations majeurs au lac et à l'exutoire (déminéralisation) et aucune tendance pour l'aluminium ce qui indique plutôt une diminution des apports atmosphériques de l'ion hydrogène.

Les écarts entre les charges atmosphériques des cations majeurs et les charges sortant à l'exutoire ont toujours été négatifs. Ces écarts sont faibles en 1989 principalement dû au faible débit d'automne.

6.3.3 L'ion hydrogène.- Les bilans chimiques annuels de l'ion H^+ montrent que ce paramètre se neutralise dans le système. Les extrants de l'ion H^+ ne représentent en moyenne que 2,4 p.100 des intrants (figure 12). Dans un système acidifié ce rapport serait beaucoup plus élevé. Les écarts entre les charges atmosphériques de

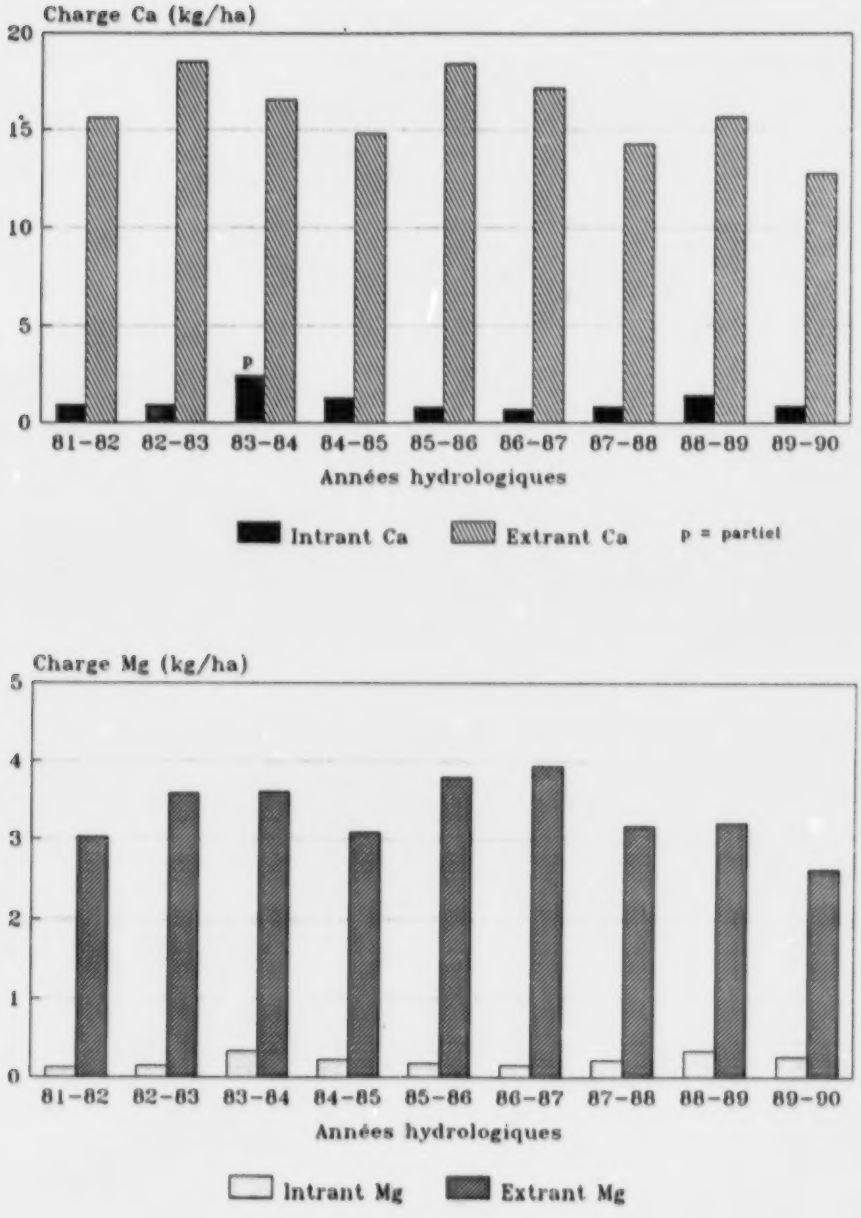


Figure 14 Bilan ionique annuel du calcium et du magnésium

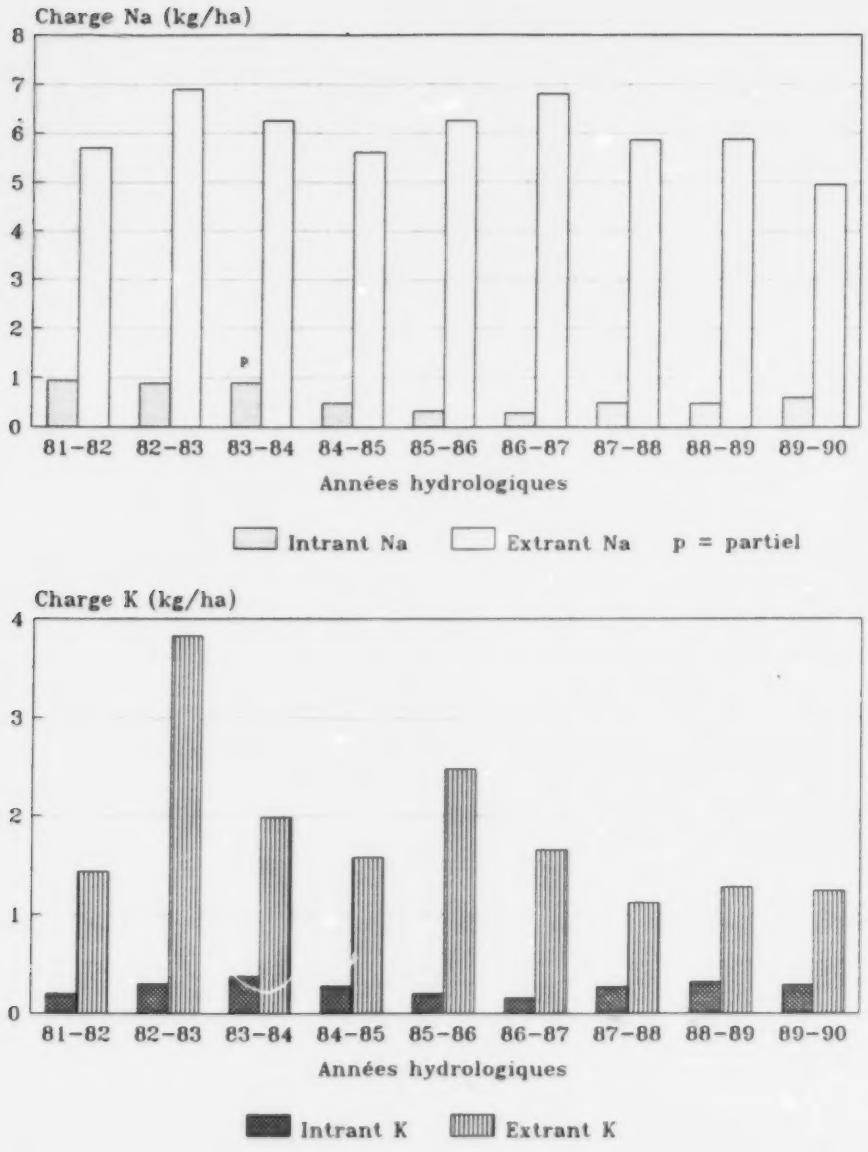


Figure 15 Bilan ionique annuel du sodium et du potassium

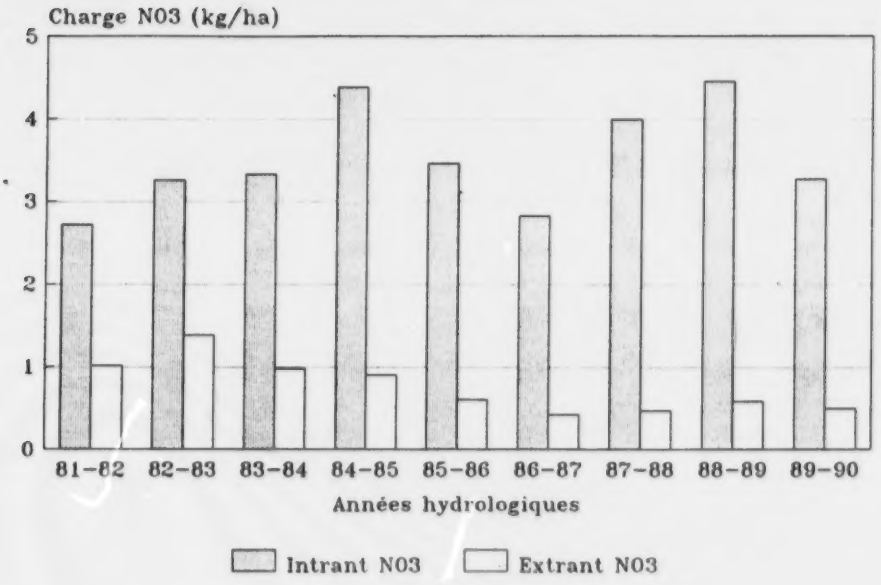
l'ion H^+ et les charges sortant à l'exutoire ont toujours été positifs (de 1981 à 1990). Les écarts de 1989 et 1990 sont faibles si on les compare aux autres années.

6.3.4 Les nitrates.- Le bilan ionique des nitrates est nettement positif. Les extrants ne représentant en moyenne que 23 p.100 des intrants (figure 16). L'assimilation des nitrates par la végétation explique la différence entre les intrants et les extrants. Une étude de Robitaille et Boutin (1990) s'échelonnant sur cinq mois (juin à octobre) de 1981 à 1987, montre que la charge moyenne de nitrates dans les précipitations globales incidentes était de 4,51 kg/ha et tombait à 1,47 kg/ha pour les précipitations sous le couvert forestier. Cette diminution de 3 kg/ha représente 67 p.100 de la charge moyenne de nitrates sur les cinq mois.

6.3.5 Les chlorures.- Les chlorures sont difficilement adsorbés ou incorporés aux minéraux dans le sol. Sa grande mobilité laisse supposer que les bilans chimiques seraient à l'équilibre, pourtant les bilans sont négatifs (figure 16). Les intrants ne représentent en moyenne que 47 p.100 des extrants. Robitaille et Boutin (1990) mesurent des concentrations de chlorures 1,8 fois plus élevée dans les eaux d'égouttement (précipitations sous le couvert forestier) que dans les précipitations incidentes. La charge moyenne des chlorures pour les précipitations globales incidentes (de juin à octobre) était de 0,96 kg/ha et augmentait à 1,47 kg/ha, soit une augmentation de 65 p.100.

6.4 Les eaux souterraines, indicateur précurseur de l'acidification

Parmi les effets des précipitations acides sur les écosystèmes aquatiques, on note la diminution de la capacité de neutralisation des sols du bassin versant. Les eaux souterraines étant responsables d'une bonne partie de la neutralisation des eaux de surface, il est important de connaître l'évolution de la qualité de ces eaux. Des données sur la qualité des eaux souterraines du bassin du lac Laflamme, ont été



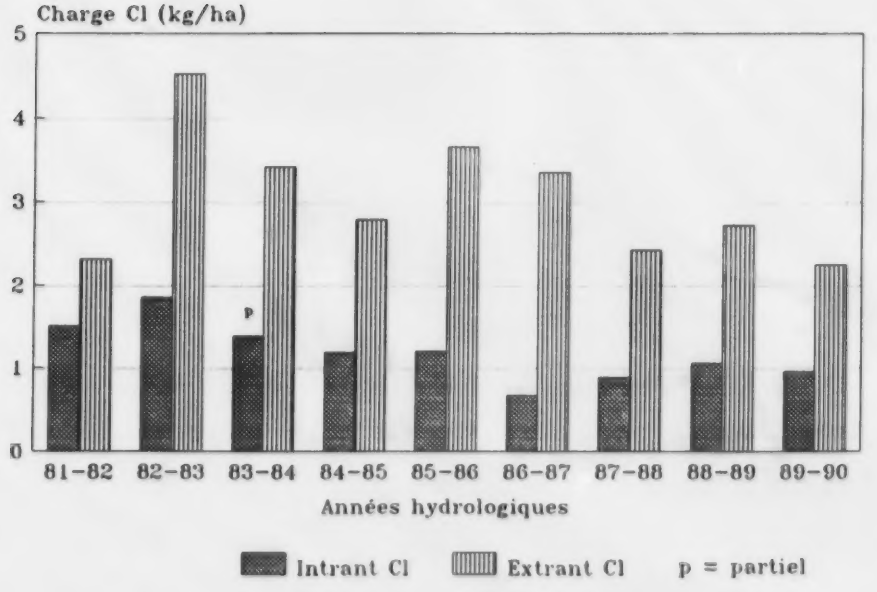


Figure 16 Bilan ionique annuel des nitrates et des chlorures

recueillies au début des années 1980 lors d'une campagne de caractérisation (Robitaille *et al.*, 1983, Bernier *et al.*, 1983). Une comparaison entre les données de 1982-83 et celles recueillies depuis juillet 1988, nous montre qu'il y a eu une légère augmentation des concentrations de sulfates dans les piézomètres de 13 m, 2,9 m et 2,8 m de profondeur. La moyenne des concentrations de sulfates pour le piézomètre de 13 m de profondeur était de 2,5 mg/l en 1982-83 tandis qu'elle se situe à 2,8 mg/l pour la période de juillet 1988 à novembre 1991. Les piézomètres de 2,9 m et 2,8 m de profondeur avaient des concentrations de 3,7 mg/l et 2,9 mg/l respectivement. Ces concentrations ont augmenté à 3,9 mg/l et 4,1 mg/l pour la période de juillet 1988 à novembre 1991. L'alcalinité des eaux souterraines semble aussi avoir augmenté. De 33,09 mg/l qu'elle était en 1982-83 dans le piézomètre de 13 m, elle a augmenté à 38,06 mg/l pour la période 1988-91. Dans le piézomètre de 2,9 m, l'alcalinité était à 1,93 mg/l en 1982-83 et augmentait à 2,4 mg/l em 1988-91. Le même phénomène se reproduit pour le piézomètre de 2,8 m, l'alcalinité étant de 1,56 mg/l en 1982-83 et de 3,2 mg/l en 1988-91.

7 CONCLUSION

Tel que démontré dans ce rapport, les séries temporelles qui sont des outils précieux dans le suivi des impacts et de la récupération des écosystèmes aquatiques face aux précipitations acides. Cependant, les changements analytiques survenus en 1990 ont nécessité une somme de travail considérable au niveau de l'estimation des valeurs manquantes pour permettre de dégager des tendances significatives statistiquement. Par contre ce travail d'estimation permettra de conserver

Les précipitations reçues en 1989 et 1990 sur le bassin versant du lac Laflamme avaient des pH moyens annuels de l'ordre de 4,5. Pour les même années, les charges atmosphériques de sulfates s'élevaient à 14,4 kg/ha/an et 16,7 kg/ha/an. L'année 1990 a enregistré des précipitations relativement importantes avec 151,1 cm par rapport à 132,6 cm qui est la moyenne pour les 10 années de mesure. C'est avec la tendance à la baisse dans les charges atmosphériques de sulfates de la série temporelle de 1981-1990 qu'on note pour la première fois une amélioration statistiquement significative dans la qualité des précipitations. Il aura fallu une réduction de 30 p.100 dans les charges atmosphériques de sulfates pour que le test de Spearman/Lettenmaier détecte une baisse. Les charges atmosphériques de ce paramètre sont sous le seuil établi de 20 kg/ha/an depuis 1986 à l'exception de 1988 où un maximun de 24 kg/ha a été atteint. Au niveau des composés azotés (NO_3 et NH_4), des tendances à la hausse dans les concentrations des précipitations sont notées. Les charges atmosphériques de l'ion ammonium montrent une tendance à la hausse.

Il semble y avoir un décalage entre les dépositions atmosphériques de sulfates et les concentrations de sulfates enregistrées dans les eaux de surface du bassin versant du lac Laflamme. En effet, en même temps que l'on enregistre une tendance à la baisse dans les charges atmosphériques des sulfates, les eaux de surface du bassin versant du lac Laflamme montrent des signes d'acidification, c'est-

à-dire une tendance à la hausse des concentrations (lac et exutoire) de sulfates et une tendance à la baisse dans l'alcalinité pour les deux stations.

Au bassin du lac Laflamme, la relation entre les concentrations de nitrates dans les précipitations et celles dans le lac et l'exutoire n'est pas directe et la cause de la diminution des concentrations de nitrates dans les eaux de surface du bassin versant est encore incertaine.

Les tendances à la hausse ou à la baisse des concentrations ou des charges dans les précipitations, au lac et à l'exutoire, nous permettent d'identifier des réponses statistiquement significatives du bassin versant du lac Laflamme face au stress acide. La caractérisation de la qualité des eaux souterraines profondes permet une un aperçu des concentrations de soufre issues de l'assise rocheuse. Le sol joue un rôle important au niveau des sulfates en agissant comme réservoir. Cependant il y a peu d'information sur la contribution de ce réservoir au bilan annuel des sulfates du bassin versant du lac Laflamme.

Au Canada, les mesures d'intervention pour la réduction des charges atmosphériques de polluants acides deviennent de plus en plus concrètes. Ces réductions d'émissions de SO_2 justifient le maintien du suivi de la récupération des écosystèmes aquatiques.

RÉFÉRENCES

APIOS, (1991). *Acidic precipitation in Ontario study, Annual programm report 1989/1990.* The Acidic Precipitation Office. Ontario Ministry of the Environment, avril 1991, 111 p.

Azzaria, L.M., P.J. Gélinas, R. Robitaille, J.F. Wilhelmy. (1982). *Étude géologique et hydrogéologique du lac Laflamme, parc des Laurentides, Québec.* Université Laval, département de géologie pour Environnement Canada, Direction des eaux intérieures, région de Québec, 95 p.

Barrie, L.A., H.A. Wiebe, K. Anlauf. (1984). *Results of the Canadian Air and Precipitation Monitoring Network APN:1982.* Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, rapport AQRB-84-005-T.

Barrie, L.A., H.A. Wiebe, P.Fellin, K. Anlauf. (1982). *Results of the Canadian Air and Precipitation Monitoring Network APN: July 1980 to December 1981.* Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, rapport AQRB-82-009-T

Bernier, P., F. Padilla, M. Dessureault, P.J. Gélinas, L. Azzaria, S. Goulet. (1983). *Étude hydrogéologique et hydrogéochimique du bassin versant du lac Laflamme - 1982.* Université Laval, Département de géologie pour Environnement Canada, Direction des eaux intérieures, région du Québec, 269 p.

Berryman, D. (1984). *La détection des tendances dans les séries temporelles de paramètres de la qualité de l'eau à l'aide de tests non paramétriques.* Thèse de maîtrise, Université du Québec, I.N.R.S.-Eau, 130 p.

Bobba, A.G., D.C.L. Lam, D.S. Jeffries, D. Bottomley, J.Y. Charette, P.J. Dillon, L.Logan. (1986). *Modelling the hydrological regimes in acidified watersheds.* Water, Air and Soil Pollution, vol 31, 155-163.

Bouchard, A. (1991). *Comparaison des résultats des deux méthodes: A.A. flamme vs ICP pour Ca Mg Na et K.* rapport préliminaire, Environnement Canada, Conservation et Protection, région du Québec, Centre Saint-Laurent, 8 p.

Boulet, G., P. Pinard. (1991). *Les précipitations acides au Québec, bilan des années 1981 à 1991.* Compte-rendu du colloque sur les précipitations acides et sur la pollution par l'ozone (smog), Montréal, 4-5 novembre 1991.

Couture, S., (1991). *Les études sur le bilan ionique du lac Laflamme: 1987-1990.* Environnement Canada, Conservation et Protection, région du Québec, Centre Saint-Laurent. 73 p.

Couture, S., A. Bouchard. (1990). *Comparaison statistique des laboratoires de Longueuil et de Sodexen à l'aide des données du réseau TADPA-Québec et du lac Laflamme pour la période de février à août/septembre 1990.* Environnement Canada, Conservation et Protection, région du Québec, Centre Saint-Laurent.

Dupont, J. (1988). *État de l'acidité des lacs de la région hydrographique de l'Outaouais.* Environnement Québec, Direction de la qualité du milieu aquatique, Publication PA-29, 99 p.

Dupont, J. (1989). *État de l'acidité des lacs de la région hydrographique de la Mauricie.* Environnement Québec, Direction de la qualité du milieu aquatique, Publication QEN/PA-33/1, 119 p.

Dupont, J. (1990). *État de l'acidité des lacs de la région hydrographique du Saguenay - Lac-Saint-Jean.* Environnement Québec, Direction de la qualité du milieu aquatique, Publication QEN/PA-38/1, 131 p.

Dupont, J. (1991). *État de l'acidité des lacs de la région hydrographique de la Côte-Nord.* Environnement Québec, Direction de la qualité du milieu aquatique, Publication QEN/PA-41/1, 119 p.

Dupont, J., Y. Grimard. (1986). *Systematic study of lake water acidity in Québec.* Water, Air, Soil Pollution, vol 31, 223-230.

Environnement Canada, (1991). *Données sur les eaux de surface - Québec 1990.* Direction générale des eaux intérieures, région du Québec et Direction des ressources en eau, Division des relevés hydrologiques du Canada, 47 p.

Houle, D., R. Carrignan. (1992). *Sulfur speciation and distribution in soil and above ground biomass of a coniferous boreal forest.* Accepté pour publication dans Biogeochemistry.

Jones H.G., J. Stein, W. Sochanski. (1991). *SNOQUAL, A Snow-Meltwater Quality Model, a Study of Model Variants.* Eastern Snow Conference, Proceeding of the 1991 Annual Meeting (48th), Guelph, Ontario, juin 1991.

RMCC. (1990). *Évaluation de l'état des connaissances actuelles sur le transport à distance des polluants atmosphériques et les dépôts acides- Partie 2: Émissions et mesures d'antipollution.* Comité fédéral-provincial de coordination de la recherche et de la surveillance, sous-groupe chargé des émissions et des mesures antipollution.

Robitaille, G., R. Boutin. (1990). *Transfert d'éléments inorganiques solubles dans une forêt de sapins baumiers située dans la région boréale.* Forêt Canada, région du Québec, Rapport d'information LAU-X-94F, 36 p.

Robitaille, R., P.Bernier, P.J. Gélinas, L.M. Azzaria. (1983). *Étude hydrogéologique du bassin versant du lac Laflamme en 1981.* Université Laval, département de géologie pour Environnement Canada, Direction des eaux intérieures, région du Québec, 165 p.

Van Stempvoort, D.R., J.J. Wills, P.Fritz. (1991). *Aboveground Vegetation Effects on the Deposition and Cycling of Atmospheric Sulfur: Chemical and Stable Isotope Evidence.* Water, Air and Soil Pollution. vol 60, 55-83.

Vet, R.J., W.B. Sukloff, M.E. Still, C.S. McNair, J.B. Martin, W.F. Kobelka, A.J. Gaudenzi. (1989). *Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN), Precipitàtion Chemistry Data Summary 1987.* Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Division de la surveillance et de l'évaluation de la qualité de l'air, 45 p.

Vet, R.J., W.B. Sukloff, M.E. Still, J.B. Martin, W.F. Kobelka, A.J. Gaudenzi. (1988a). *Canadair Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN), Precipitation Chemistry Data Summary 1986.* Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Division de la surveillance et de l'évaluation de la qualité de l'air, 468 p.

Vet, R.J., W.B. Sukloff, M.E. Still, J.B. Martin, W.F. Kobelka, A.J. Gaudenzi. (1988b). *Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN), Precipitation Chemistry Data Summary 1985.* Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Division de la surveillance et de l'évaluation de la qualité de l'air, 482 p.

Vet, R.J., W.B. Sukloff, M.E. Still, R. Gilbert (1986). *Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN), Precipitation Chemistry Data Summary 1983-1984.* Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Division de la surveillance et de l'évaluation de la qualité de l'air, 544 p.

Wiebe, H.A., R.J. Vet, L.A. Barrie, L. Anlauf. (1985). *Canadian Air and Precipitation Monitoring Network (CAPMoN), Precipitation Chemistry Data Summary 1983-1984.* Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Division de la surveillance et de l'évaluation de la qualité de l'air, 105 p.

ANNEXE 1

Données de laboratoire du lac Laflamme
1990 et 1991

Données de laboratoire du lac Laflamme (1990)

	Date		pH	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	AlcG mg/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	P mg/l	Cond us/cm	Coul unité	Al mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l
90	1	2	6,2	2,7	0,50	1,1	0,21	6,21	4,5	0,6	0,09	0,012	27	28	0,120	0,140	0,016	0,008
		9	6,2	2,8	0,60	1,1	0,19	6,24	4,7	0,6	0,10	0,011	27	29	0,111	0,147	0,017	0,005
		16	6,2	2,7	0,60	1,1	0,26	6,24	5,0	0,6	0,11	0,018	27	30	0,105	0,151	0,012	0,006
		23	6,2	2,8	0,60	1,1	0,22	6,26	5,0	0,5	0,13i	0,019	27	28	0,094	0,143	0,011	0,005
		31	6,2	2,8	0,60	1,0	0,22	6,65	4,6	0,4	0,14	0,009	27	24	0,087	0,147	0,016	0,005
	2	6	6,3	2,8	0,60	1,2	0,30	6,52	4,6	0,6	0,17	0,025	28	25	0,082	0,166	0,022	0,005i
		13	6,2	2,9	0,60	1,1	0,24	7,13	3,9	0,4	0,17	0,013	28	25	0,079	0,193	0,017	0,005
		20	6,2	2,9	0,60	1,2	0,24	7,14	4,3	0,5	0,16	0,008	31	24	0,083	0,212	0,026	0,006
		27	6,2	3,0	0,60	1,3	0,31	5,73	4,1	0,7	0,17	0,017	29	25	0,128	0,178	0,024	0,009
	3	6	6,4i	3,0	0,60	1,3	0,34	7,00	4,4	0,6	0,18	0,017	29	21	0,080	0,264	0,033	0,006
		13	6,6	3,0	0,60	1,2	0,30	5,55i	4,1	0,5	0,20	0,029	29	23i	0,077	0,300	0,035	0,007
		20	6,0	2,2	0,50	0,9	0,20	4,10	3,4	0,4	0,26	0,021	23	24	0,057	0,176	0,024	0,005
		27	6,5	2,6	0,50	0,9	0,22	5,54	4,1	0,4	0,34	0,006	21	22	0,061	0,222	0,031	0,005
	4	3	6,3	2,7	0,60	1,3	0,33	5,98	4,0	0,6	0,32	0,009	29	21	0,072	0,229	0,032	0,008
		10	6,1	2,5	0,60	1,0	0,23	5,22	4,2	0,5	0,33	0,008	28	23	0,064	0,278	0,032	0,006
		17	5,9	2,6	0,60	1,1	0,21	5,00	4,2	0,4	0,39	0,018	28	22	0,066	0,247	0,033	0,007
		24	6,1	2,7	0,60	1,1	0,22	4,98	3,9	0,4	0,21	0,009	27	24	0,067	0,439	0,039	0,005
	5	1	5,9	2,1	0,50	0,9	0,28	3,77	3,3	0,4	0,09	0,017	23	29	0,083	0,382	0,041	0,008
		8	5,8	2,3	0,60	1,0	0,25	4,94	4,1	0,4	0,09	0,017	24	39	0,107	0,417	0,050	0,006
		15	6,1	1,9	0,40	0,8	0,33	3,29	3,7	0,4	0,06	0,017	20	42	0,115	0,338	0,040	0,007
(a)		22	6,1	1,8	0,40	0,9	0,35	3,61	3,9	0,5	0,04	0,011	20	28	0,163	0,288	0,028	0,005
		30	6,2	1,8	0,40	0,7	0,25	3,36	3,9	0,3	0,02	0,008	18	24	0,128	0,118	0,014	0,004
	6	5	6,2	1,8	0,40	0,8	0,30	3,49	3,9	0,4	0,03	0,009	19	24	0,113	0,122	0,010	0,004
		12	6,3	1,8	0,40	0,8	0,25	3,44	4,1	0,4	0,03	0,010	19	25	0,114	0,081	0,009	0,005
		19	6,1	1,8	0,40	0,9	0,34	3,59	3,9	0,5	0,04	0,016	20	32	0,135	0,098	0,010	0,006
		26	6,1	1,8	0,40	0,7	0,21	2,75	3,8	0,4	0,02	0,012	19	32	0,137	0,100	0,012	0,005
	7	3	6,2	1,8	0,41	0,8	0,21	2,95	3,9	0,4	0,00	0,016	19	27	0,137	0,097	0,013	0,005
		10	6,2	1,8	0,41	0,8	0,23	3,12	3,8	0,4	0,01	0,011	19	24	0,203	0,110	0,012	0,006
		17	6,4	1,8	0,42	0,9	0,24	2,83	4,0	0,5	0,01	0,013	19	27	0,114	0,099	0,012	0,005
		24	6,4	1,7	0,45	0,8	0,16	3,33	4,3	0,4	<0,01	0,013	19	25	0,106	0,094	0,013	0,004
		31	6,7	1,9	0,44	0,9	0,22	3,44	3,9	0,4	0,01	0,015	20	25	0,113	0,131	0,016	0,005
	8	7	6,5	1,8	0,45	0,8	0,19	3,44	4,5	0,4	0,01	0,009	19	21	0,085	0,089	0,014	0,004
		14	6,4	1,8	0,45	0,9	0,21	3,31	4,1	0,4	0,01	0,013	20	22	0,090	0,096	0,014	0,004
		21	6,4	1,9	0,44	1,1	0,20e	3,07	4,3	0,5	0,01	0,013	22	17	0,089	0,105	0,014	0,010
		28	6,5	1,9	0,44	0,9	0,19	3,65	3,6	0,3	<0,01	0,009	20	21	0,075	0,100	0,014	0,003
(b)	9	4	ND	2,2c	0,60e	1,1e	0,20e	4,78e	ND	ND	ND	0,011	ND	ND	0,082	0,139	0,013	0,004
		11	ND	2,2c	0,60e	1,1e	0,20e	4,78e	ND	ND	ND	0,007	ND	ND	0,073	0,194	0,012	0,004
		18	ND	2,3c	0,60e	1,2e	0,37e	5,47e	ND	ND	ND	0,012	ND	ND	0,071	0,172	0,010	0,012
		25	ND	2,3c	0,60e	1,1e	0,15e	4,87e	3,5l	ND	<0,04	0,012	ND	ND	0,067	0,163	0,008	0,002
	10	2	ND	2,3c	0,60c	1,1c	0,18c	4,93c	3,5i	ND	<0,04i	0,009	ND	ND	0,075	0,153	0,008	0,006
		9	ND	2,2c	0,50c	1,0c	0,15c	4,31c	3,5l	ND	<0,04	0,010	ND	ND	0,105	0,153	0,009	0,004
		16	ND	2,0c	0,50c	0,9c	0,15c	3,75c	3,8i	ND	<0,04i	0,009	ND	ND	0,170	0,149	0,012	0,006
		23	ND	2,0c	0,50c	1,0c	0,15c	3,93c	4,0l	ND	<0,04	0,005	ND	ND	0,171	0,142	0,012	0,005
		30	ND	2,0c	0,50c	0,9c	0,11c	3,67c	ND	ND	ND	0,013	ND	ND	0,165	0,126	0,011	0,005
	11	8	ND	2,1c	0,50c	1,0c	0,15c	4,12c	ND	ND	ND	0,009i	ND	ND	0,158i	0,111i	0,011i	0,006i
		13	ND	2,1c	0,50c	1,1c	0,18c	4,36c	ND	ND	ND	0,004	ND	ND	0,148	0,096	0,010	0,006
		20	6,3	2,3	0,47	0,9	0,17	3,45	4,3	0,4	0,06	0,008	21	26	0,142	0,101	0,010	0,008
		26	6,2	2,2	0,49	0,9	0,14	3,90	4,3	0,4	0,06	0,007	22	24	0,138	0,083	0,010	0,004
	12	3	6,2	2,4	0,45	0,9	0,14	3,92	5,1	0,5	0,05	0,006	22	28	0,128	0,098	0,011	0,005
		11	6,5l	2,3c	0,50c	1,0c	0,15c	4,57l	ND	ND	ND	0,006	21l	ND	0,120	0,097	0,012	0,005
		18	6,3l	2,6c	0,60c	1,1c	0,16c	5,01l	ND	ND	ND	0,007	21l	ND	0,124	0,128	0,017	0,006
		25	6,3i	2,6i	0,60i	1,1i	0,16i	5,45i	ND	ND	ND	0,007i	21i	ND	0,121i	0,129i	0,163i	0,006i

(a) Changement de méthode analytique pour les métaux lourds
(b) Arrêt des analyses au laboratoire régional de Longueuil
c = valeurs corrigées l = laboratoire alternatif i = interpolation ND = Données non disponibles

Données de laboratoire du lac Laflamme (1991)

Date			pH	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	AlcG mg/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	P mg/l	Cond us/cm	Coul unité	Al mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l
91	1	2	6,3l	2,5c	0,56c	1,1c	0,15c	5,25l	ND	ND	ND	0,006	21l	ND	0,117	0,129	0,016	0,005
		8	6,1l	2,8c	0,61c	1,3c	0,38c	6,22l	ND	ND	ND	0,009	18l	ND	0,120	0,176	0,021	0,011
		15	6,4l	2,8c	0,64c	1,5c	0,38c	6,13l	ND	ND	ND	0,009	19l	ND	0,118	0,197	0,022	0,010
		22	6,3l	2,8c	0,63c	1,2c	0,17c	6,22l	ND	ND	ND	0,007	22l	ND	0,113	0,181	0,023	0,005
(a)		29	6,1	2,5	0,53	1,2	0,23	5,62	4,5	0,6	0,15	0,009	27	18	0,102	0,138	0,019	0,006
	2	5	6,1	2,7	0,57	1,2	0,25	6,40	4,4	0,5	0,16	0,009	27	23	0,104	0,197	0,025	0,008
		12	6,2	2,8	0,60	1,2	0,17	6,97	4,1	0,5	0,14	0,011	27	24	0,102	0,168	0,023	0,005
		19	6,2	2,8	0,60	1,2	0,23	6,59	4,2	0,5	0,13	0,007	28	20	0,099	0,225	0,026	0,005
		26	6,0	2,7	0,60	1,4	0,43	6,38	4,3	1,1	0,14	0,010	30	24	0,110	0,200	0,030	0,009
	3	5	6,1	2,8	0,62	1,2	0,26	6,94	4,2	0,5	0,16	0,007	29	24	0,107	0,203	0,034	0,006
		12	6,1	2,8	0,61	1,4	0,39	6,99	4,0	0,8	0,15	0,010	30	23	0,109	0,231	0,039	0,008
		19	6,0	2,9	0,66	1,1	0,36	7,30	3,7	0,5	0,18	0,032	29	21	0,114	0,306	0,047	0,012
		26	6,1	2,9	0,64	1,1	0,21	7,37	4,0	0,4	0,18	0,033	28	17	0,100	0,302	0,041	0,005
	4	3	6,0	2,9	0,65	1,1	0,21	7,25	3,5	0,4	0,21	0,036	27	24	0,092	0,387	0,043	0,005
		9	6,0	2,5	0,57	1,1	0,22	6,15	3,8	0,4	0,24	0,027	26	22	0,099	0,219	0,034	0,006
		16	6,2	2,6	0,59	1,1	0,28	6,58	4,0	0,4	0,21	0,008	27	27	0,107	0,328	0,045	0,006
		23	6,4	2,7	0,62	1,1	0,25	6,94	3,6	0,4	0,20	0,007	26	22	0,089	0,304	0,042	0,005
		30	6,1	2,3	0,51	1,1	0,35	5,05	3,1	0,5	0,23	0,007	24	20	0,097	0,240	0,038	0,005
	5	7	6,8	2,4	0,53	1,1	0,35	4,61l	3,6	0,6l	0,19	0,010	23l	36	0,149	0,291	0,042	0,008
		14	6,2	2,1	0,47	0,9	0,33	4,16	3,4	0,6	0,11	0,015	22	35	0,160	0,347	0,031	0,007
		21	6,4	1,8	0,40	0,7	0,18	3,18	3,2	0,4	0,07	0,014	18	32	0,162	0,232	0,022	0,006
		28	6,4	1,7	0,36	0,7	0,13	2,88	3,5	0,5	0,04	0,010	18	21	0,137	0,112	0,011	0,007
	6	4	6,5	1,5	0,38	0,7	0,18	3,28	3,3	0,4	0,01	0,023	18	26	0,131	0,155	0,009	0,006
		11	6,1	1,7	0,39	0,7	0,18	3,11	3,5	0,4	0,01	0,011	18	25	0,118	0,109	0,007	0,005
		18	6,6	1,8	0,40	0,8	0,17	3,02	3,5	0,4	<0,02	0,010	18	20	0,104	0,157	0,006	0,004
		25	6,8	1,9	0,43	0,9	0,19	3,63	3,5	0,4	<0,02	0,008	19	22	0,103	0,085	0,006	0,004
	7	2	6,7l	1,9l	0,43l	0,9l	0,15l	3,72l	3,7	0,3	<0,02	0,011	19l	21l	0,093	0,073	0,006	0,004
		9	6,6	1,8	0,43	0,8	0,10	3,80	3,7	0,3	0,02	0,008	19	20	0,086	0,072	0,007	0,003
		16	6,6	1,7	0,44	0,8	0,11	3,79	4,0	0,4	<0,02	0,010	19	20	0,084	0,084	0,007	0,003
		23	6,8	1,7	0,44	0,8	0,12	3,95	3,4	0,3	<0,02	0,017	19	23	0,084	0,075	0,008	0,004
		30	6,6	2,1	0,50	0,9	0,12	3,52	3,7	0,2	<0,02	0,009	19	19	0,069	0,103	0,009	0,003
	8	6	6,5	2,1	0,50	0,9	0,20	4,50	3,4	0,4	<0,02	0,010	20	17	0,067	0,095	0,008	0,003
		13	6,9	1,9	0,35	0,8	0,20	4,42	3,2	0,3	<0,02	0,013	18	19	0,065	0,131	0,009	0,005
		20	6,8	1,8	0,50	0,9	0,18	4,51	3,3	0,3	<0,02	0,011	19	15	0,066	0,113	0,009	0,003
		27	6,6	1,9	0,54	1,1	0,30	4,78	3,3	0,6	<0,02	0,011	23	19	0,064	0,159	0,009	0,003
	9	3	6,6	2,2	0,54	1,0	0,17	5,15	3,3	0,3	<0,02	0,011	21	25	0,073	0,172	0,009	0,004
		10	6,7l	2,1	0,44	1,0	0,15	5,50	3,2	0,3	<0,02	0,008	21	23	0,063	0,165	0,009	0,002
		17	6,8	2,1	0,46	1,0	0,21	5,54	3,2	0,3	<0,02	0,012	21	22	0,069	0,151	0,009	0,006
		24	6,6	2,1	0,50	0,9	0,16	5,99	3,1	0,3	<0,02	0,009	21	23	0,065	0,148	0,007	0,003
		30	6,7	2,3	0,52	0,9	0,17	5,63	3,1	0,3	<0,02	0,006	21	21	0,067	0,136	0,007	0,002
	10	9	6,8	2,2	0,46	1,0	0,19	4,71	3,5	0,4	0,03	0,011	21	27	0,109	0,156	0,009	0,004
		15	7,0	2,2	0,48	0,9	0,19	4,45	3,6	0,4	0,04	0,014	22	25	ND	ND	ND	ND
		22	6,7	2,2	0,47	0,8	0,10	4,28	3,7	0,3	0,04	0,007	20	28	ND	ND	ND	ND
		29	6,6l	2,2l	0,42l	0,9l	0,13l	3,65l	3,5l	0,4l	0,06l	0,010l	20l	33l	ND	ND	ND	ND
	11	5	6,8	2,3	0,49	0,9	0,15	3,92	3,7	0,5	0,06	0,008	21	28	ND	ND	ND	ND
		12	6,5	2,7	0,54	1,1	0,27	4,11	4,1	0,5	0,06	0,013	23	31	ND	ND	ND	ND
		19	6,5	2,5	0,49	1,0	0,28	4,50	4,3	0,5	0,06	0,010	24	23	ND	ND	ND	ND
		26	6,4	2,6	0,49	1,0	0,38	4,64	4,1	0,3	0,05	0,008	23	28	ND	ND	ND	ND
	12	3	6,5	2,6	0,50	1,1	0,31	4,81	4,1	0,5	0,14	0,011	24	25	ND	ND	ND	ND
		12	6,3	2,7	0,52	0,9	0,14	5,34	4,1	0,3	0,30	0,011l	24	24	ND	ND	ND	ND

(a) Reprise des analyses au laboratoire régional de Longueuil
c = valeurs corrigées l = laboratoire alternatif I = interpolation ND = Données non disponibles

PARAMETRES ÉCHANTILLONNÉS AUX DEUX MOIS

Date	COD mg/l	CID mg/l	SiO_2 mg/l	NH_4 mg/l	SO_4 (a) mg/l
90 1 31	---	---	9,59	----	---
90 3 27	---	---	8,00	0,037	---
90 5 30	4,6	0,7	5,01	0,005	---
90 7 31	---	---	----	----	---
90 10 2	---	---	----	----	---
91 1 29	1,8	2,6	9,52	0,019	---
91 3 26	3,4	1,5	9,60	<0,001	---
91 5 28	4,0	0,7	----	<0,001	---
91 8 6	3,5	0,1	4,19	0,004	---
91 9 30	3,3	1,6	5,54	0,006	---
91 11 26	4,9	1,1	6,92	0,027	---

(a) Sulfates analysés par chromatographie ionique

ANNEXE 2

Données de laboratoire de l'exutoire du lac Laflamme
1990 et 1991

Données de laboratoire de l'exutoire du lac Laflamme (1990)

	Date	pH	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	AlcG mg/l	SO_4 mg/l	Cl mg/l	NO_3 mg/l	P mg/l	COND µS/cm	COUL uni.	Al mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l
90	1 2	6,2	2,6	0,50	1,0	0,15	4,88	5,1	0,4	0,10	0,006	26	28	0,120	0,096	0,004	0,004
	9	6,3	2,5	0,50	1,0	0,16	4,89	5,1	0,4	0,10	0,006	25	26	0,182	0,099	0,002	0,004
	16	6,3	2,4	0,50	1,0	0,18	5,17	5,1	0,4	0,10	0,006	24	26	0,102	0,096	0,013	0,005
	23	6,3	2,5	0,50	1,0	0,16	5,15	4,9	0,4	0,09	0,006	24	24	0,092	0,072	0,000	0,004
	31	6,3	2,5	0,50	1,0	0,09	5,19	4,5	0,4	0,10	0,005	24	21	0,093	0,066	0,007	0,004
	2 6	6,4	2,5	0,50	1,0	0,22	5,55	4,5	0,4	0,11	0,005	25	25	0,088	0,067	0,011	0,004
	13	6,3	2,6	0,50	1,1	0,22	5,67	4,2	0,4	0,11	0,005	25	21	0,087	0,124	0,011	0,004
	20	6,2	2,6	0,50	1,1	0,23	5,89	4,0	0,3	0,10	0,006	26	21	0,082	0,128	0,008	0,004
	27	6,2	2,6	0,50	1,1	0,24	4,70	4,3	0,4	0,09	0,005	26	21	0,076	0,151	0,014	0,004
	3 6	6,3i	2,6	0,50	1,1	0,22	5,35	4,2	0,3	0,10	0,005	25	17	0,079	0,206	0,027	0,004
	13	6,4	2,7	0,50	1,0	0,21	5,88	4,0	0,3	0,09	0,005	25	36	0,074	0,315	0,035	0,004
	20	6,0	2,7	0,60	1,0	0,21	4,39	4,5	0,4	0,20	0,005	27	31	0,078	0,265	0,049	0,004
	27	6,5	2,5	0,50	1,0	0,21	5,72	4,3	0,4	0,23	0,003	22	26	0,076	0,279	0,038	0,004
	4 3	6,3	2,6	0,50	1,1	0,23	5,49	4,3	0,4	0,24	0,006	27	21	0,077	0,325	0,042	0,004
	10	6,2	2,8	0,60	1,1	0,21	5,72	4,8	0,4	0,24	0,004	28	23	0,067	0,219	0,035	0,004
	17	5,9	2,8	0,60	1,1	0,21	5,90	4,4	0,4	0,23	0,004	29	22	0,067	0,259	0,036	0,004
	24	6,1	2,7	0,60	1,1	0,20	4,94	4,5	0,4	0,26	0,004	27	24	0,070	0,243	0,041	0,004
	5 1	5,0	1,2	0,20	0,4	0,31	-0,39	4,1	0,3	0,15	0,009	16	29	0,144	0,123	0,034	0,004
	8	5,1	1,0	0,20	0,4	0,16	-0,09	3,3	0,2	0,07	0,006	13	25	0,127	0,170	0,027	0,004
	15	6,1	1,8	0,40	0,7	0,27	2,59	3,7	0,5	0,05	0,009	19	38	0,118	0,278	0,032	0,004
(a)	22	6,0	1,7	0,40	0,7	0,22	2,51	3,8	0,3	0,04	0,007	17	28	0,145	0,181	0,021	0,004
	30	6,2	1,7	0,40	0,7	0,24	2,64	3,7	0,3	0,03	0,010	17	24	0,189	0,120	0,011	0,003
	6 5	6,1	1,8	0,40	0,8	0,27	3,27	4,1	0,4	0,03	0,007	18	24	0,113	0,082	0,009	0,003
	12	6,2	1,7	0,40	0,8	0,25	3,02	4,3	0,3	0,02	0,008	18	25	0,110	0,080	0,009	0,003
	19	6,1	1,7	0,40	0,7	0,21	2,41	4,2	0,3	0,01	0,008	17	32	0,166	0,088	0,010	0,004
	26	6,1	1,7	0,40	0,7	0,18	2,41	3,8	0,4	0,02	0,010	18	32	0,139	0,108	0,016	0,004
	7 3	6,2	1,6	0,40	0,8	0,18	2,23	3,9	0,4	<0,01	0,009	17	27	0,139	0,110	0,015	0,004
	10	6,2	1,6	0,40	0,8	0,17	2,42	3,8	0,4	0,01	0,009	17	24	0,125	0,088	0,012	0,004
	17	6,4	1,6	0,40	0,8	0,17	2,39	4,0	0,4	0,01	0,009	18	27	0,154	0,107	0,014	0,003
	24	6,4	1,5	0,40	0,8	0,13	2,67	4,1	0,3	<0,01	0,009	18	25	0,125	0,100	0,013	0,003
	31	6,5	1,7	0,40	0,8	0,15	2,88	4,1	0,3	0,01	0,008	18	25	0,128	0,123	0,018	0,003
	8 7	6,4	1,7	0,40	0,8	0,14	2,63	4,5	0,3	0,01	0,008	18	25	0,095	0,096	0,015	0,003
	14	6,5	1,7	0,40	0,8	0,14	2,58	4,2	0,3	0,02	0,007	18	22	0,089	0,079	0,012	0,003
	21	6,4	1,6	0,40	0,8	0,12	2,71	4,0	0,3	0,01	0,008	19	21	0,117	0,010	0,011	0,002
	28	6,6	1,8	0,40	0,8	0,14	3,12	3,8	0,3	<0,01	0,006	19	21	0,152	0,111	0,012	0,002
(b)	9 4	ND	1,9c	0,51c	1,0c	0,12c	3,64c	ND	ND	ND	0,008	ND	ND	0,084	0,101	0,010	0,002
	11	ND	2,1c	0,53c	1,0c	0,12c	4,03c	ND	ND	ND	0,006	ND	ND	0,077	0,149	0,009	0,002
	18	ND	2,1c	0,54c	1,0c	0,12c	4,03c	ND	ND	ND	0,006	ND	ND	0,071	0,148	0,007	0,002
	25	ND	2,1c	0,54c	1,0c	0,12c	4,03c	3,8l	ND	<0,04l	0,006	ND	ND	0,071	0,136	0,006	0,002
	10 2	ND	2,2c	0,50c	1,0c	0,13c	4,25c	3,9i	ND	<0,04i	0,009	ND	ND	0,102	0,141	0,007	0,005
	9	ND	2,1c	0,50c	0,9c	0,11c	3,82c	3,9l	ND	<0,04l	0,006	ND	ND	0,129	0,141	0,008	0,003
	16	ND	2,0c	0,50c	0,9c	0,10c	3,60c	4,2i	ND	<0,04i	0,006	ND	ND	0,164	0,135	0,010	0,004
	23	ND	1,9c	0,40c	0,9c	0,11c	3,23c	4,4l	ND	<0,04l	0,008	ND	ND	0,177	0,130	0,010	0,005
	30	ND	2,0c	0,50c	1,0c	0,11c	3,82c	ND	ND	ND	0,007	ND	ND	0,167	0,104	0,010	0,004
	11 8	ND	2,1c	0,50c	1,0c	0,11c	4,01c	ND	ND	ND	0,005	ND	ND	0,152	0,092	0,009	0,004
	13	ND	2,2c	0,50c	1,0c	0,12c	4,23c	ND	ND	ND	0,009	ND	ND	0,153	0,087	0,008	0,004
	20	6,3	2,2	0,50	0,9	0,13	3,27	4,6	0,5	0,06	0,000	21	26	0,145	0,078	0,009	0,004
	26	6,3	2,4	0,50	0,9	0,14	3,24	4,4	0,4	0,06	0,006	22	24	0,139	0,078	0,008	0,004
	12 3	6,2	2,3	0,50	1,0	0,23	2,68	4,1	0,4	0,09	0,003	22	32	0,157	0,099	0,011	0,004
	11	6,5l	2,3c	0,50c	1,0c	0,11c	4,57l	ND	ND	ND	0,005	21l	ND	0,150	0,089	0,011	0,005
	18	6,3l	2,3c	0,50c	1,0c	0,11c	3,43l	ND	ND	ND	0,004	19l	ND	0,141	0,089	0,010	0,005
	25	6,2i	2,2i	0,40i	1,0i	0,11i	4,21i	ND	ND	ND	0,004i	18i	ND	0,140i	0,091i	0,012i	0,005i

(a) Changement de méthode analytique pour les métaux lourds
(b) Arrêt des analyses au laboratoire régional de Longueuil
c = valeurs corrigées l = laboratoire alternatif i = interpolation ND = données non disponibles

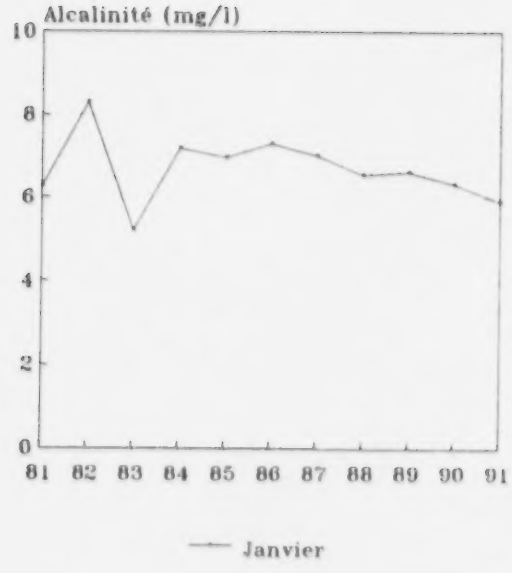
Données de laboratoire de l'exutoire du lac Laflamme (1991)

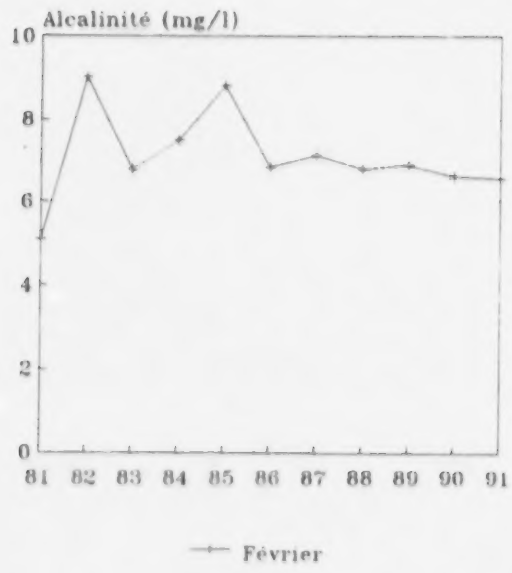
Date			pH	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	AlcG mg/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	P mg/l	Cond us/cm	Coul unité	Al mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Zn mg/l
91	1	2	6,1l	2,1c	0,44c	0,9c	0,11c	3,17l	ND	ND	ND	0,003	17l	ND	0,138	0,093	0,013	0,004
		8	6,0l	2,2c	0,46c	1,0c	0,12c	3,64l	ND	ND	ND	0,003	15l	ND	0,169	0,088	0,013	0,005
		15	6,4l	2,3c	0,48c	1,0c	0,12c	4,12l	ND	ND	ND	0,004	23l	ND	0,117	0,093	0,015	0,004
		22	6,3l	2,4c	0,50c	1,0c	0,14c	4,56l	ND	ND	ND	0,004	18l	ND	0,112	0,125	0,020	0,005
(a)		29	6,1	2,2	0,44	1,0	0,14	4,38	4,4	0,3	0,10	0,004	22	18	0,108	0,124	0,021	0,004
	2	5	6,1	2,3	0,46	1,0	0,12	5,12	4,3	0,3	0,10	0,007	22	20	0,105	0,145	0,028	0,005
		12	6,1	2,5	0,50	1,0	0,14	4,92	4,2	0,3	0,09	0,009	24	24	0,099	0,184	0,035	0,004
		19	6,2	2,5	0,52	1,0	0,16	5,74	4,2	0,3	0,08	0,004	24	23	0,106	0,226	0,035	0,004
		26	6,4	2,6	0,42	1,0	0,22	6,28	4,3	0,4	0,10	0,004	25	24	0,099	0,284	0,040	0,004
	3	5	6,0	2,6	0,53	1,0	0,16	6,25	4,1	0,3	0,11	0,004	26	24	0,118	0,354	0,038	0,003
		12	6,1	2,7	0,53	1,0	0,16	6,30	4,3	0,3	0,12	0,006	26	23	0,095	0,350	0,036	0,003
		19	6,1	2,7	0,56	1,0	0,17	6,78	3,6	0,3	0,12	0,032	26	25	0,097	0,499	0,045	0,004
		26	5,9	2,8	0,57	1,0	0,19	7,36	3,8	0,3	0,10	0,020	26	21	0,103	0,557	0,050	0,004
	4	4	6,1	2,8	0,58	1,0	0,21	7,14	3,2	0,4	0,14	0,025	26	24	0,101	0,435	0,047	0,004
		9	6,0	2,5	0,52	1,0	0,20	5,00	4,5	0,4	0,26	0,026	26	29	0,122	0,328	0,053	0,005
		16	5,2	2,4	0,52	1,0	0,22	4,97	4,4	0,4	0,24	0,005	25	27	0,108	0,214	0,037	0,004
		23	6,2	2,3	0,49	1,0	0,20	4,16	4,5	0,4	0,31	0,003	24	22	0,139	0,176	0,034	0,005
		30	5,4	1,6	0,27	0,6	0,22	0,69	3,7	0,3	0,41	0,005	19	27	0,253	0,160	0,035	0,007
	5	7	5,3	1,2	0,21	0,5	0,22	0,67	3,1	0,3	0,18	0,005	15	28	0,220	0,109	0,024	0,006
		14	6,3	1,9	0,43	0,7	0,17	3,52	3,3	0,3	0,10	0,008	19	39	0,166	0,306	0,028	0,004
		21	6,3	1,7	0,39	0,7	0,14	2,82	3,2	0,4	0,08	0,008	17	32	0,158	0,177	0,018	0,004
		28	6,3	1,6	0,34	0,6	0,08	2,40	3,5	0,3	0,03	0,005	17	24	0,141	0,094	0,011	0,004
	6	4	6,5	1,3	0,33	0,6	0,11	2,24	3,4	0,3	0,01	0,008	16	30	0,136	0,092	0,010	0,003
		11	5,9	1,6	0,36	0,7	0,13	2,53	3,6	0,3	0,01	0,008	17	25	0,113	0,076	0,010	0,002
		18	6,5	1,6	0,36	0,8	0,12	2,53	3,6	0,3	<0,02	0,008	17	24	0,105	0,078	0,010	0,002
		25	6,6	1,6	0,40	0,8	0,12	2,67	3,5	0,3	<0,02	0,008	17	22	0,094	0,079	0,012	0,002
	7	2	6,5	1,6	0,39	0,8	0,12	3,01	3,7	0,3	<0,02	0,008	18	18	0,094	0,088	0,011	0,002
		9	6,5	1,6	0,40	0,8	0,09	2,85	3,7	0,4	0,02	0,006	18	17	0,087	0,082	0,009	0,003
		16	6,6	1,6	0,41	0,8	0,10	3,24	4,0	0,4	0,02	0,010	18	23	0,086	0,090	0,009	0,002
		23	6,6	1,6	0,41	0,8	0,08	3,27	3,5	0,3	<0,02	0,008	18	23	0,076	0,089	0,012	0,002
		30	6,5	1,9	0,45	0,9	0,10	3,63	3,7	0,2	<0,02	0,009	18	19	0,081	0,114	0,016	0,002
	8	6	6,7	2,0	0,47	0,9	0,12	4,09	3,5	0,3	<0,02	0,008	18	17	0,072	0,083	0,008	0,002
		13	6,9	2,0	0,37	0,7	0,12	3,57	3,2	0,3	<0,02	0,008	20	19	0,072	0,097	0,009	0,001
		20	6,7	1,6	0,49	0,9	0,10	3,98	3,4	0,3	<0,02	0,007	18	15	0,064	0,090	0,007	0,001
		27	6,5	2,0	0,50	0,9	0,12	4,60	3,2	0,4	<0,02	0,007	20	19	0,068	0,117	0,008	0,002
	9	3	6,7	1,9	0,51	0,9	0,13	4,46	3,3	0,3	<0,02	0,006	19	21	0,074	0,141	0,007	0,001
		10	6,6	2,0	0,42	1,0	0,12	4,68	3,1	0,3	<0,02	0,006	20	23	0,083	0,155	0,008	0,002
		17	6,7	2,0	0,43	1,0	0,15	4,92	3,3	0,3	<0,02	0,007	20	26	0,078	0,147	0,007	0,002
		24	6,7	2,0	0,47	0,9	0,13	5,18	3,1	0,3	<0,02	0,006	20	23	0,107	0,149	0,006	0,001
		30	6,7	2,2	0,51	0,9	0,15	5,10	3,1	0,3	<0,02	0,006	20	21	0,081	0,132	0,006	0,001
	10	9	6,8	2,2	0,47	0,8	0,06	4,51	3,5	0,3	0,03	0,007	21	27	0,110	0,131	0,007	0,002
		15	7,0	2,2	0,47	0,8	0,11	4,14	3,6	0,3	0,03	0,006	20	29	ND	ND	ND	ND
		22	6,7	2,2	0,49	0,9	0,14	3,91	3,7	0,4	0,05	0,011	20	28	ND	ND	ND	ND
		29	6,7i	2,2i	0,48i	0,9i	0,12i	3,82i	3,7i	0,4i	0,06i	0,010i	21i	28i	ND	ND	ND	ND
	11	5	6,6	2,2	0,47	0,8	0,10	3,73	3,6	0,4	0,06	0,008	20	28	ND	ND	ND	ND
		12	6,7	2,9	0,57	1,0	0,15	4,41	4,6	0,4	0,06	0,008i	23	31	ND	ND	ND	ND
		19	6,6	2,7	0,53	1,0	0,15	4,27	4,6	0,3	0,06	0,008	23	26	ND	ND	ND	ND
		26	6,4	2,5	0,47	1,0	0,40	4,36	4,3	0,3	0,03	0,007	22	28	ND	ND	ND	ND
	12	3	6,4	2,5	0,48	1,0	0,15	4,36	4,1	0,3	0,08	0,007	22	25	ND	ND	ND	ND
		12	6,1	2,7	0,50	0,9	0,14	5,09i	4,5	0,3	<0,02	0,010	26	21	ND	ND	ND	ND

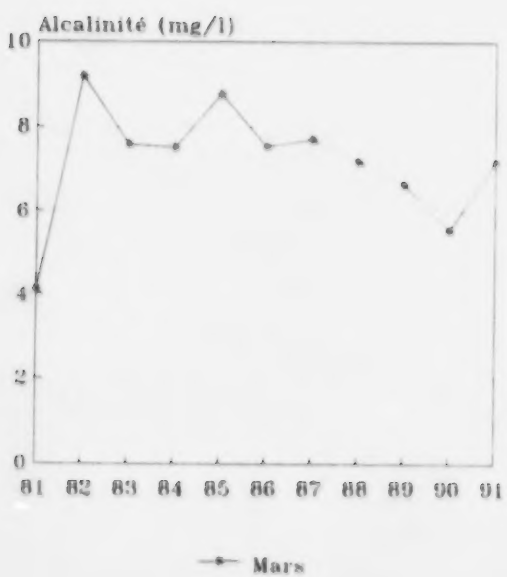
(a) Reprise des analyses au laboratoire régional de Longueuil
c = valeurs corrigées l = laboratoire alternatif i = interpolation ND = données non disponibles

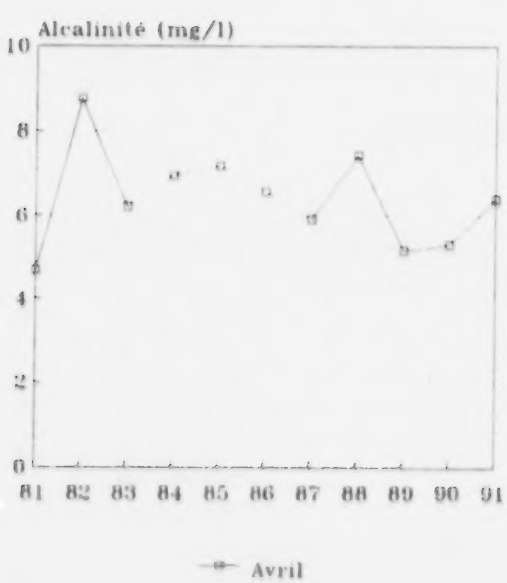
ANNEXE 3

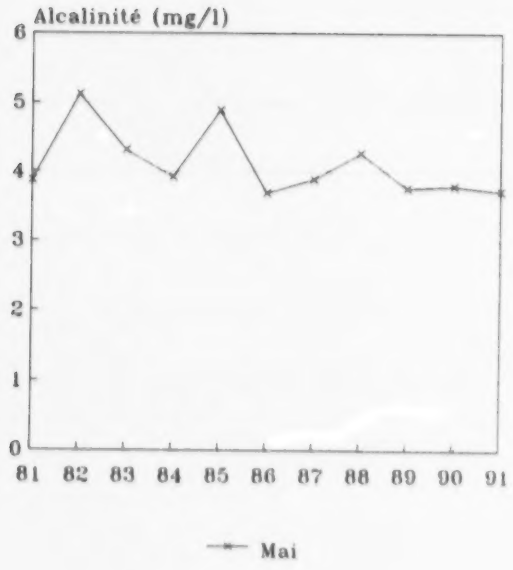
Évolution des moyennes mensuelles de l'alcalinité (1981-1990)

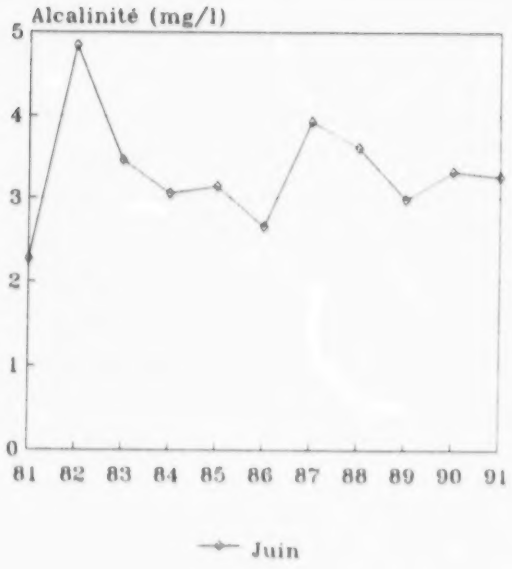

Alcalinité (mg/l)
10
8
6
4
2
0
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Janvier

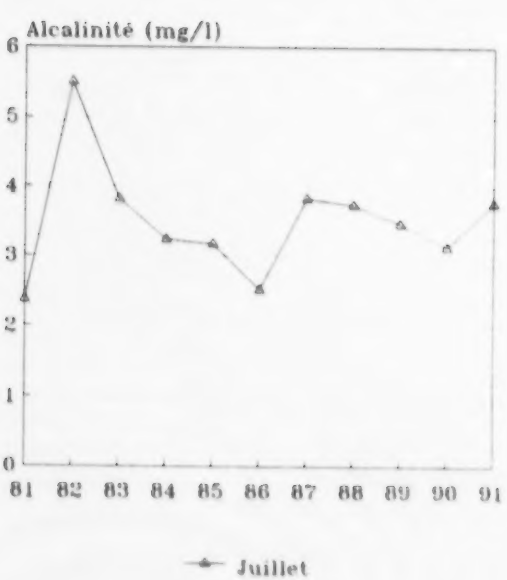

Alcalinité (mg/l)
10
8
6
4
2
0
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Février

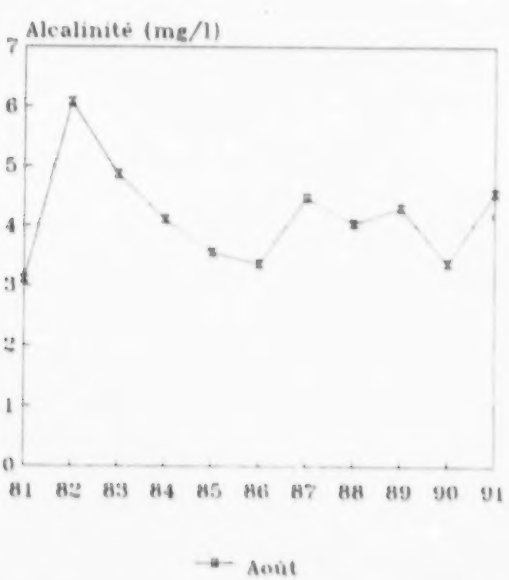

Alcalinité (mg/l)
10
8
6
4
2
0
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Mars

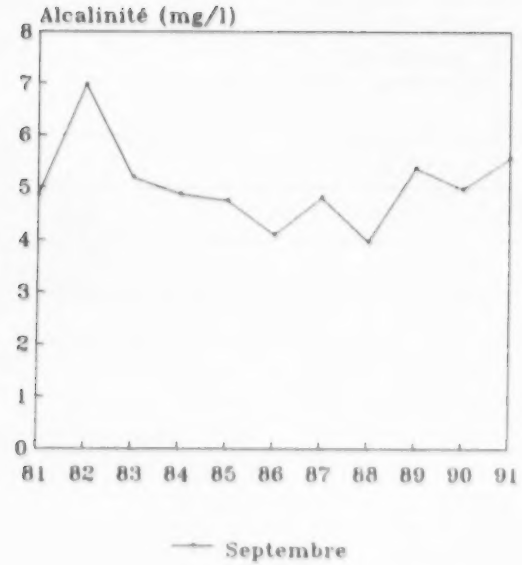

Alcalinité (mg/l)
10
8
6
4
2
0
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Avril

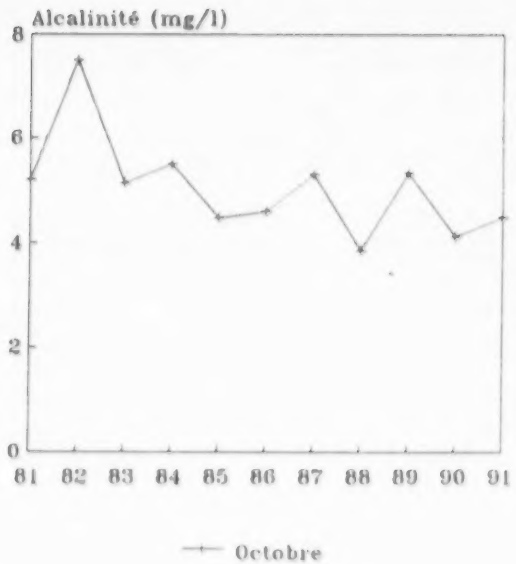

Alcalinité (mg/l)
0
1
2
3
4
5
6
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Mai

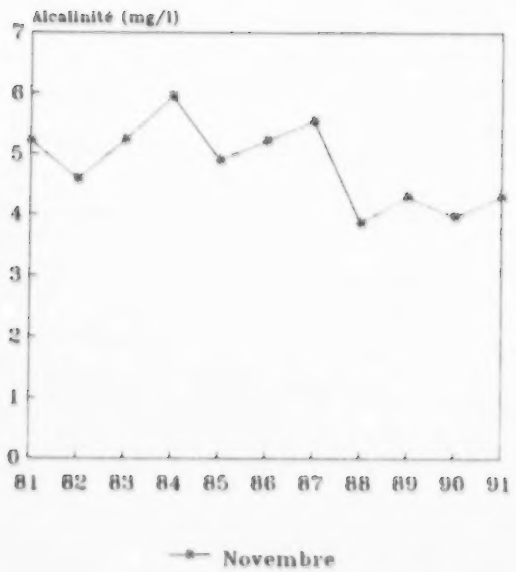

Alcalinité (mg/l)
0
1
2
3
4
5
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Juin

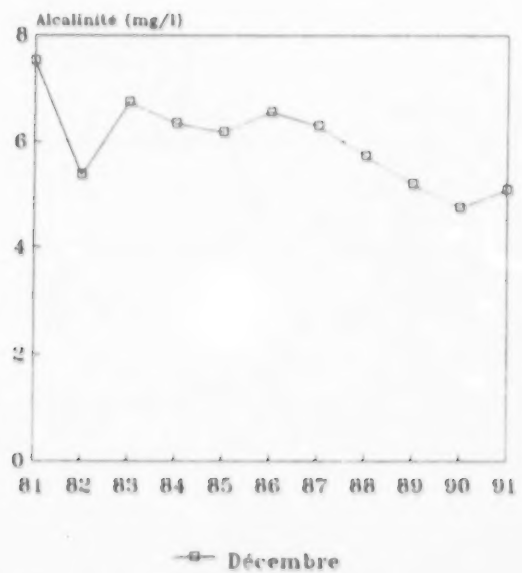

Alcalinité (mg/l)
0
1
2
3
4
5
6
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Juillet


Alcalinité (mg/l)
0
1
2
3
4
5
6
7
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Août


Alcalinité (mg/l)
8
7
6
5
4
3
2
1
0
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Septembre


Alcalinité (mg/l)
8
6
4
2
0
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Octobre


Alcalinité (mg/l)
7
6
5
4
3
2
1
0
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Novembre


Alcalinité (mg/l)
8
6
4
2
0
81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91
Décembre

ANNEXE 4

Apports atmosphériques mensuels pour le bassin versant du lac Laflamme en 1989 (kg/ha)

Mois	H^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	N NH_4^+	$SO_4^=$	Cl^-	N NO_3^-	Précipitations (APN) (mm)
Janvier	0,038	0,05	0,031	0,03	0,021	0,09	0,67	0,07	0,43	104,2
%	10	5	10	5	8	5	5	8	13	10
Février	0,028	0,05	0,011	0,05	0,008	0,03	0,30	0,09	0,37	65,1
%	8	5	4	10	3	2	2	10	12	6
Mars	0,041	0,25	0,046	0,05	0,051	0,25	1,74	0,09	0,42	73,1
%	11	24	15	10	18	13	12	10	13	7
Avril	0,023	0,09	0,012	0,02	0,012	0,13	0,88	0,04	0,23	56,8
%	6	8	5	4	4	7	6	4	7	5
Mai	0,029	0,08	0,034	0,05	0,046	0,14	1,27	0,10	0,20	152,2
%	8	8	11	10	16	7	9	11	6	14
Juin	0,029	0,10	0,030	0,03	0,025	0,14	1,30	0,06	0,18	99,7
%	8	10	10	5	9	7	9	6	6	9
Juillet	0,019	0,11	0,020	0,02	0,011	0,13	0,95	0,03	0,12	84,6
%	5	10	7	4	4	7	7	3	4	8
Août	0,060	0,12	0,024	0,02	0,028	0,49	3,64	0,09	0,37	124,2
%	17	11	8	4	10	26	25	10	12	11
Sept.	0,017	0,05	0,028	0,01	0,007	0,08	0,82	0,02	0,12	34,8
%	5	5	9	2	3	4	6	2	4	3
Oct.	0,030	0,10	0,041	0,15	0,055	0,29	1,66	0,20	0,25	152,1
%	8	10	14	29	20	15	12	21	8	14
Nov.	0,035	0,03	0,020	0,08	0,015	0,12	0,97	0,10	0,30	103,0
%	10	3	7	15	5	6	6	11	9	9
Déc.	0,015	0,01	0,000	0,01	0,000	0,03	0,22	0,04	0,22	42,4
%	4	1	0	1	0	1	1	4	6	3
Total	0,364	1,04	0,297	0,51	0,281	1,92	14,42	0,93	3,21	1092,2

ANNEXE 4 (suite)

Apports atmosphériques mensuels pour le bassin versant du lac Laflamme en 1990 (kg/ha)

Mois	H^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	N NH_4^+	$SO_4^=$	Cl^-	N NO_3^-	Précipitations (APN) (mm)
Janvier	0,040	0,05	0,020	0,03	0,019	0,25	0,69	0,06	0,41	104,4
%	10	4	7	5	6	10	4	6	11	8
Février	0,040	0,13	0,031	0,07	0,027	0,20	1,05	0,14	0,48	97,1
%	10	11	10	11	8	8	6	13	13	7
Mars	0,036	0,08	0,019	0,09	0,053	0,21	1,24	0,14	0,32	86,6
%	9	7	6	14	16	8	7	13	9	6
Avril	0,036	0,05	0,015	0,04	0,016	0,19	1,26	0,07	0,33	77,0
%	9	4	5	6	5	8	8	6	9	6
Mai	0,019	0,07	0,015	0,05	0,023	0,16	1,29	0,03	0,18	82,6
%	5	6	5	8	7	6	8	3	5	6
Juin	0,040	0,10	0,025	0,03	0,040	0,33	2,28	0,06	0,29	126,2
%	10	8	8	5	12	13	14	6	8	9
Juillet	0,023	0,16	0,032	0,05	0,054	0,17	1,36	0,08	0,15	117,1
%	6	14	11	8	15	7	8	7	4	9
Août	0,019	0,09	0,020	0,02	0,019	0,13	0,97	0,08	0,11	89,9
%	5	8	7	3	6	5	6	7	3	7
Sept.	0,039	0,13	0,026	0,02	0,014	0,26	1,94	0,04	0,31	81,1
%	9	11	9	3	4	10	12	4	9	6
Oct.	0,054	0,14	0,040	0,14	0,025	0,26	2,29	0,23	0,38	204,1
%	13	11	13	22	7	10	14	21	11	15
Nov.	0,033	0,10	0,029	0,04	0,025	0,29	1,43	0,07	0,33	114,6
%	8	8	10	6	7	12	8	6	9	9
Déc.	0,035	0,09	0,026	0,06	0,025	0,08	0,91	0,09	0,34	155,2
%	8	8	9	10	7	3	5	8	9	12
Total	0,413	1,18	0,299	0,63	0,340	2,52	16,71	1,07	3,63	1335,9

ANNEXE 5

Exportations mensuelles à l'exutoire du lac Laflamme en 1990 (kg/ha)

Mois	H^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	Alc	SO_4^{--}	Cl^-	N NO_3^-	Al	Ptotal
Jan.	0,00010	0,50	0,10	0,20	0,03	1,00	1,00	0,08	0,02	0,03	0,001
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Fév.	0,00012	0,57	0,11	0,23	0,04	1,21	0,97	0,08	0,02	0,02	0,001
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Mars	0,00010	0,49	0,10	0,20	0,04	1,02	0,81	0,07	0,03	0,01	0,001
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Av.	0,00313	1,78	0,37	0,70	0,20	2,92	3,54	0,30	0,18	0,08	0,005
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Mai	0,00921	2,78	0,59	1,09	0,45	3,01	7,19	0,63	0,14	0,27	0,015
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Juin	0,00083	1,90	0,44	0,82	0,24	2,95	4,50	0,39	0,02	0,15	0,009
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Juil.	0,00017	0,50	0,12	0,25	0,05	0,76	1,23	0,12	0,00	0,04	0,003
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Août	0,00014	0,76	0,18	0,36	0,06	1,26	1,59	0,12	0,00	0,05	0,003
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Sept.	0,00001*	0,74	0,18	0,35	0,04	1,42	0,62*	0,01*	0,00*	0,03	0,002
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Oct.	0,00000#	3,70	0,88	1,67	0,20	6,72	6,90*	0,00#	0,04*	0,27	0,012
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Nov.	0,00018*	1,57	0,35	0,68	0,09	2,58	1,47*	0,15*	0,02*	0,11	0,005
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Déc.	0,00027*	1,33	0,29	0,58	0,08	2,17	0,54*	0,05*	0,01*	0,09	0,002
%	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

* Résultats partiels

\# Aucun résultat disponible pour le mois